

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Analýza technologického procesu ve vztahu k topografii finálního
povrchu vytvořeného laserovým obráběním**

Analysis of Technological Process in Relation to the Topography of Final
Surface Produced by Laser Machining

Student: Bc. Marek Šafář

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Šafář**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: Analýza technologického procesu ve vztahu k topografii finálního povrchu vytvořeného laserovým obráběním
Analysis of Technological Process in Relation to the Topography of Final Surface Produced by Laser Machining
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Provést literární rešerši.
2. Úvod do problematiky.
4. Analýza vlivu fyzikálně-mechanických procesů při laserovém obrábění materiálů.
5. Metodika hodnocení topografie povrchu.
6. Návrh experimentů.
7. Měření a vyhodnocení dat.
8. Interpretace výsledků měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

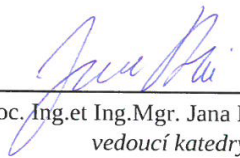
- [1] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. Drsnost povrchu. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
[2] MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie: Advanced methods of material removal. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
[3] ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1999.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

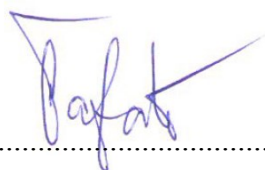
Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Janu Valíčkovi, Ph.D. a paní Ing. Martě Harničárové, PhD. za cenné rady a připomínky při tvorbě diplomové práce. Také děkuji všem řešitelům projektů studentských grantových soutěží číslo SP2016/94 a SP2017/116. Dále bych rád poděkoval slečně Bc. et. Bc. Tereze Marešové, která mi během psaní této práce byla oporou a pomohla mi s formátováním textu.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě



.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že se na moji diplomovou práci plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

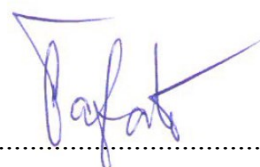
Beru na vědomí, že

- Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3);
- odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Souhlasím s tím, že

- diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden její výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce;
- údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, a to v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě



.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Marek Šafář

Adresa trvalého pobytu autora práce: Krumpach 29, Zábřeh 78901

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Šafář, M. Analýza technologického procesu ve vztahu k topografii finálního povrchu vytvořeného laserovým obráběním. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 62 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

Diplomová práce je zaměřena na vysvětlení technologie obrábění laserovým paprskem a na topografii povrchu vzniklého při řezání laserovým paprskem. Je zde provedený rozbor problematiky, ověření koncepce řešení, výběr experimentálních postupů a volba experimentálních metod, vlastní měření, analýza a interpretace výsledků. V rámci interpretace naměřených hodnot jsou v diplomové práci systematicky analyzované vztahy mezi topografickými a technologickými parametry. V závěru práce je navržena optimalizace řezných parametrů na základě fyzikálně-mechanické a tepelné interakce laserového paprsku s obráběným materiálem.

ANNOTATION OF THESIS

Šafář, M. Analysis of Technological Process in Relation to the Topography of Final Surface Produced by Laser Machining. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2017, 62 p. Thesis head: doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

The master thesis is focused on the explanation of the laser beam cutting technology and the topography of the surface created by laser beam cutting. There is an analysis of the problem, verification of the concept of solution, selection of experimental procedures and choice of experimental methods, own measurement, analysis and interpretation of results. As part of the interpretation of measured values, the master thesis systematically analyzes the relationships between topographic and technological parameters. At the end is designed optimization of cutting parameters is proposed based on physico-mechanical and thermal interaction of laser beam with machined material.

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek.....	11
Seznam symbolů a zkratk	12
Úvod.....	14
1 Cíl práce	15
2 Laser a jeho fyzikální podstata	16
2.1 Princip laseru	17
2.2 Fyzikální vlastnosti laserového paprsku	19
3 Technologie řezání laserovým paprskem.....	23
3.1 Tavné řezání.....	24
3.2 Oxidační řezání	24
3.3 Sublimační řezání	24
3.4 Řezání Microjet.....	24
3.5 Interakce laserového paprsku s materiálem	25
3.6 Technologické faktory ovlivňující kvalitu řezu.....	26
4 Typy laserů	28
4.1 Pevnolátkové lasery	28
4.1.1 Rubínový laser	29
4.1.2 Nd – YAG laser	30
4.1.3 Nd – sklo laser	31
4.2 Plynové lasery	32
4.2.1 CO ₂ laser.....	32
4.2.2 Helium – neonový laser	33
4.2.3 Argonový laser	33
4.2.4 Dusíkový laser	34
4.3 Polovodičové lasery	34
4.4 Excimerové lasery.....	34
4.5 Kapalínové (barvivové) lasery	36
4.6 Vláknové lasery	36
5 Metody hodnocení topografie povrchu	38
5.1 Metrologie kvality povrchu a jeho parametry.....	38
5.2 Metody hodnocení a měření topografie povrchu	42
5.2.1 Mechanické metody.....	42
5.2.2 Optické metody	43
5.2.3 Jiné metody.....	44
5.3 Metody měření pro řešení experimentální části.....	44
5.4 Hlavní geometrické parametry topografie řezných stěn	46
6 Experimentální část	48
6.1 Experimentální řezání	48
6.1.1 Charakteristika materiálu oceli S235JRH (ČSN 11375)	51
6.2 Experimentální měření.....	52
6.3 Experimenty na laserovém systému PLATINO 2040 / CP3500 a ZAPHIRO / CV5000	54
6.3.1 Použitá zařízení pro realizaci experimentální části	55
6.3.2 CNC 2D/3D laser Prima Industry Zaphiro CV 5000	55
6.3.3 CNC 2D laser Prima Industry PLATINO 2040 / CP3500	56
6.4 Experimentální příprava zkušebních vzorků	57
6.5 Způsob vyhodnocení získaných dat.....	58
6.5.1 Vyhodnocení dat programem Talymap	58

6.5.2	Vyhodnocení dat programem SURPAK SJ.....	59
6.5.3	Vliv zdvihu a fokusace	59
6.5.4	Termodynamické procesy v řezech	62
6.6	Stanovení základních technologických parametrů a distribuce drsnosti povrchu	67
6.7	Hodnocení dosažených výsledků.....	73
7	Závěr.....	76
	Seznam použité literatury.....	77
	Přílohy	80

Seznam obrázků

obr.2.1 Dráhy elektronů atomu vodíku [15]	16
obr.2.2 Schéma optického rezonátoru [30]	18
obr.2.3 Porovnání zaostření bílého a laserového světla [14]	20
obr.2.4 Rozbíhavost, prostorový profil a fokusace charakteristického laserového paprsku [14]	21
obr.2.5 Ukázky módové struktury laserů a jejich TEM označení [14]	22
obr.3.1 Schéma řezání laserovým paprskem [22]	23
obr.3.2 Interakce laserového paprsku s materiálem	26
obr.3.3 Ishikawův diagram pro technologii laserového řezání [7]	26
obr.4.1 Rubínový laser zkonstruovaný Theodorem H. Maimanem [31]	30
obr.5.1 Geometrický model povrchu [2]	39
obr.5.2 Profil povrchu [3]	39
obr.5.3 Přenosové charakteristiky pro profil drsnosti a vlnitosti [3]	40
obr.5.4 Rozdělení metod hodnocení a měření drsnosti povrchu	42
obr.5.5 Schéma kontaktního profilometru [32]	43
obr.5.6 Surftest SJ – 400 [27]	45
obr.5.7 Schéma dotykového hrotu [27]	46
obr.5.8 Geometrické parametry řezné hrany u CO ₂ laserového řezání a způsob měření parametrů Ra_x , Y_{retx} , δ_x , h_x v bodě X ve stopě řezu [8]	47
obr.6.1 TruLaser 3030 od firmy Trumpf [33]	48
obr.6.2 Experimentální vzorky	50
obr.6.3 parametry měření Surftest SJ – 400, Surftest SJ – 401 a Talysurf	52
obr.6.4 Princip měření kontaktním profilometrem [12]	53
obr.6.5 Průběh hodnot parametrů Ra , Rq , Rz v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 1	54
obr.6.6 Záznam měření topografie povrchu pomocí kontaktního profilometru Surftest SJ – 400	54
obr.6.7 CNC 2D / 3D laser Prima Industrie, typ Zaphiro / CV5000 [37]	55
obr.6.8 Platino 2040 / CP 3500 [37]	56
obr.6.9 Příklad zobrazení textury povrchu - vzorek S235JRG2	59
obr.6.10 Průběh závislosti $(+/-)f = fce(z)$ pro ocel AISI 304	60
obr.6.11 Konkávní tvary finálního profilu v případě volby záporných hodnot fokusace $(-)f$ pro ocel AISI 304	61
obr.6.12 Konvexní tvary finálního profilu v případě volby kladných hodnot fokusace $(+)f$ pro ocel AISI 304	61
obr.6.13 Kontrola funkčních závislostí $\rho_{sur} = fce(E_{mat})$ a $\rho_m = fce(E_{mat})$	63
obr.6.14 Kontrola korelačních závislostí $K_{plmat} = fce(E_{mat})$ a $T_{melt} = fce(E_{mat})$ pro prvky podle Tab.6.12	63
obr.6.15 Stanovení X_{melt} pro ocel S235JRH (ČSN 11375)	64

obr.6.16 Kontrola závislostí $T_{melt} = fce(E_{mat})$, resp. inverzně $E_{mat} = fce(T_{melt})$ pro technické materiály podle Tab.6.13	65
obr.6.17 Kontrola korelačních závislostí $h_{Xtp} = fce(\sigma_{suro})$ a $T_{melt} = fce(\sigma_{suro})$	65
obr.6.18 Kontrola korelačních závislostí $\sigma_{suro} = fce(T_{melt})$ a $\rho_m = fce(T_{melt})$	66
obr.6.19 Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti pro ocel S235JRH	69
obr.6.20 Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti pro nikl	70
obr.6.21 Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti pro ocel S355JO	70
obr.6.22 Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti pro ocel AISI304	71
obr.6.23 Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti pro titan	71
obr.6.24 Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti pro měď	72
obr.6.25 Závislost parametrů $(h_0, h_{xt}(gr)) = fce(E_{mat})$ pro vybrané materiály	72

Seznam tabulek

tab.3.1 Porovnání metod a jejich hustot energie	23
tab.4.1 Porovnání CO ₂ laseru a Nd – YAG laseru [14]	31
tab.5.1 Technické parametry kontaktního profilometru SurfTest SJ – 400 [27]	45
tab.6.1 Technické parametry laseru TruLaseru 3030 a TruFlow 4000 [33]	49
tab.6.2 Konstantní technologické parametry	51
tab.6.3 Technologické parametry při výrobě jednotlivých vzorků	51
tab.6.4 Chemické složení oceli S235JRH	52
tab.6.5 Mechanické vlastnosti oceli S235JRH	52
tab.6.6 Základní fyzikální vlastnosti oceli S235JRH	52
tab.6.7 Podmínky vyhodnocení měření	53
tab.6.8 Specifikace laseru Zaphiro / CV5000 [37].	56
tab.6.9 Specifikace laseru PLATINO 2040 / CP 350 [37].	57
tab.6.10 Přehled testovaných materiálů	57
tab.6.11 Experimentální podmínky CO ₂ laserového řezání	58
tab.6.12 Numerické hodnoty pro prvky [23]	62
tab.6.13 Numerické hodnoty pro technické materiály [23]	64
tab.6.14 Technologické parametry pro vybrané materiály	69

Seznam symbolů a zkratek

Θ	rozbíhavost (divergence) [rad]
I	intenzita záření [W.cm ⁻²]
λ_s	filtr profilu definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu
λ_c	filtr profilu definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti
λ_f	filtr profilu definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu
Ra	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [μm]
Ra_x	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu v bodě X ve stopě řezu [μm]
Ra_d	drsnost v radiálním směru [μm]
RaT	teoretická drsnost [μm]
RaM	naměřená drsnost [μm]
$RadT$	teoretická drsnost v radiálním směru [μm]
$RadM$	naměřená drsnost v radiálním směru [μm]
Rq	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu [μm]
Rz	Největší výška profilu [μm]
Rsk	šikmost posuzovaného profilu (skewness) [μm]
Rku	špičatost posuzovaného profilu (kurtosis) [μm]
Y_{ret}	odchylka stopy řezu (retardace stopy řezu) [mm]
Y_{retx}	odchylka stopy řezu (retardace stopy řezu) v bodě X ve stopě řezu [mm]
δ	úhel zakřivení dělicí stopy (deviace) [°]
δ_x	úhel zakřivení dělicí stopy (deviace) v bodě X ve stopě řezu [°]
h	tloušťka dělicího řezu [mm]
h_x	hloubka dělicího řezu v bodě X ve stopě řezu [mm]

h_{Xt}	hloubka trojného termodynamického bodu v řezu [mm],
h_j	jednotková hloubka řezu [mm]
h_0	hloubková úroveň neutrální roviny [mm]
h_{vz}	tloušťka děleného materiálu [mm]
h_{cut}	hloubka řezu [mm]
h_{lim}	maximální (limitní) tloušťka děleného materiálu pro daný laser [mm]
h_{Xtp}	hloubková poloha trojného termodynamického bodu v řezu [mm]
K_{cutL}	materiálová konstanta dělitelnosti [μm]
K_{plmat}	konstanta plasticity [μm]
E_{mat}	modul pružnosti materiálu v tahu (Youngův modul) [MPa]
σ_{sur0}	povrchové napětí na hloubkové úrovni h_0 [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
T_{melt}	tavná teplota materiálu [$^{\circ}\text{C}$]
X_{tmelt}	trojný termodynamický bod
T_{melth}	teplota stěn v řezu podle h [$^{\circ}\text{C}$]
T_{lasoph}	teplota objemová optimalizovaná v řezu podle h [$^{\circ}\text{C}$]
f	fokusace ohniska [mm]
z	vzdálenost laseru od povrchu materiálu (zdvih) [mm]
Re	mez kluzu [MPa]
W_{las}	výkon laseru [W]
IND_{vpw}	index optimálního poměru posuvové rychlosti k výkonu laseru [-]
v_p	posuvová rychlost [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]
p	tlak [bar]
d_d	průměr trysky [mm]
TEM	tvar průřezu svazku (Transverse Electromagnetic Mode)
QED	kvantová elektrodynamika (quantum electrodynamics)

Úvod

Jeden z moderních trendů ve strojírenském průmyslu se zaměřuje na zvyšování produktivity a efektivity práce v oblasti obrábění, řezání či dělení materiálů. Zlepšování technologie obrábění je jasnou odezvou na vývoj nových typů materiálů, které mohou být charakterizovány zejména vysokou tvrdostí, korozivzdorností, odolností proti opotřebením, žáruvzdorností, ale i zvýšenou křehkostí a náchylností k lomům. Takové druhy materiálů mohou být těžko obrobitelné klasickými, konvenčními metodami obrábění. Z tohoto důvodu si získaly významné postavení nekonvenční metody obrábění a s nimi spojené technologie. Důležitou technologií v tomto směru je obrábění nebo dělení materiálu laserem. Tato technologie se od svého vzniku, datovaného k roku 1960, kdy svět spatřil nové světlo generované laserem, velmi vyvinula. V dnešní době existuje několik typů laserů, jejichž aplikace dosahují velmi zajímavých parametrů, převážně z hlediska kvality obrobenej plochy, rychlosti obrábění nebo řezání, efektivnosti a ekologičnosti. Pokud odbočím od strojírenství, tak poměrně velký vývoj laserů v poslední době zaznamenává vojenský průmysl.

Předkládané řešení diplomové práce je zaměřené na objasnění technologie řezání laserovým paprskem, převážně z hlediska topografie povrchu. Poskytuje nový pohled na deformační proces způsobený účinkem laserového paprsku. Stále častěji se vyžaduje dělit nebo jinak obrábět konstrukční materiály se špičkovými užitkovými vlastnostmi, t.j. konstrukční materiály s vysokými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Projektová příprava a řízení technologie už nevystačí se subjektivními rozhodnutími a musí být stále sofistikovanější. Ve stále větší míře, než je tomu doposud, bude nucena využívat exaktní postupy rozhodování a rychlé operativní možnosti metod a způsobů interaktivního matematického modelování technologických procesů. Zákonitosti rychlého vývoje v potřebách praxe kladou nové požadavky na výzkum a na adekvátní teoretickou podporu. Na odhalování stále nových možností rychlého využití přírodovědeckých a vědeckotechnických poznatků v praxi.

1 Cíl práce

Technologie řezání materiálů laserovým paprskem je charakterizovaná jako technologie s využitím flexibilního nástroje, kterým je laserový paprsek. Analýza topografie povrchu je velmi důležitá k popisu a definování geometrických parametrů, ale zejména k pochopení mechanismu procesu dělení materiálu. Cílem diplomové práce je měření, analýza a interpretace získaných dat ze vzniklých ploch po řezání laserovým paprskem ve vztahu k vybraným technologickým parametrům na kvalitu řezné plochy. Analytické zpracování mechanismu procesu dělení po stránce fyzikálně–mechanické interakce nástroje s materiálem a po stránce termodynamické. Na základě analýzy výsledků měření a výsledků analytických prací realizovat interaktivní matematicko-fyzikální model a exaktní způsob navrhování technologického režimu dělení materiálu laserem.

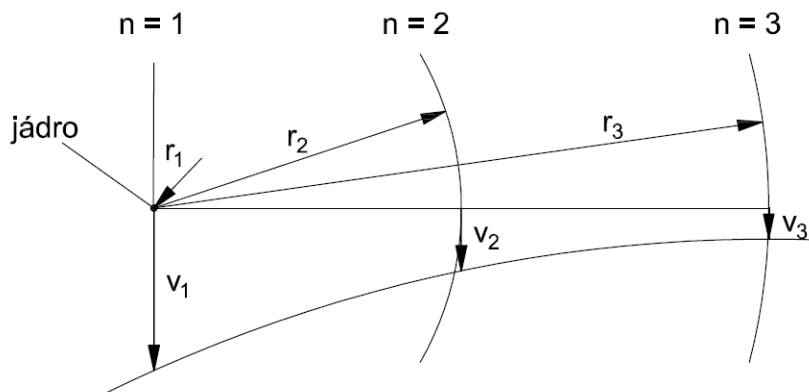
Úlohy při obsahovém řešení diplomové práce jsou:

- analýza současného stavu technologie řezání laserovým paprskem,
- klasifikace technologických parametrů a zhodnocení měřicích metod topografie povrchu, návrh vhodných měřicích metod topografie povrchu,
- teoretická východiska, vypracování koncepce a návrhu pro řešení současného stavu,
- příprava vzorků, analýza, interpretace a verifikace experimentálních dat z měření topografie povrchu,
- analytické zpracování mechanismu procesu dělení,
- analytické zpracování termodynamiky dělení,
- vypracování příslušných výpočtových algoritmů,
- verifikace navrhovaných řešení.

2 Laser a jeho fyzikální podstata

Historický vývoj poznatků o laserovém paprsku začíná popisem teoretických základů stimulované (nucené) emise záření, které popsal Albert Einstein v roce 1917. Začátkem 50. let 20. století byli položeny základy kvantové elektrodynamiky (QED – quantum electrodynamics). První laser navrhli C. H. Townes a A. L. Schawlow v roce 1958 [11]. První funkční laser byl sestaven a představen veřejnosti v roce 15. května 1960 americkým fyzikem T. H. Maimanem (Hughes Lab., USA). Jednalo se o rubínový laser s vlnovou délkou 694,3 nm. Tento laser využíval jen tři energetické hladiny krystalu rubínu a proto mohl pracovat pouze v pulsním režimu. Tento nedostatek odstranili fyzici N. G. Basov, A. M. Prochorov a Ch. H. Townes použitím více energetických hladin, čímž bylo umožněno ustavení populační inverze, a tím i kontinuální činnosti laseru. Za svůj objev společně obdrželi v roce 1964 Nobelovu cenu [24], [25], [35].

Fyzikální základy a princip funkce laseru lze vysvětlit na základě pojmů kvantové fyziky. Planetární model atomu, který navrhl Ernest Rutherford v roce 1911 na základě experimentů německého fyzika Hanse Geigera a britského fyzika Ernesta Marsdena, je složen z velmi malého, hmotného a kladně nabitého jádra (protonu), okolo kterého krouží po uzavřených drahách záporně nabitě elektrony, podléhající elektrostatickým silám (obr.2.1). Každé dráze patří přesně určené množství energie (energetická hladina). Vzdálenější dráha elektronu má větší množství energie, protože na překonání přitažlivé síly protonu je potřeba vykonat větší práci. Při běžných podmínkách se atom nachází ve stavu s nejmenší energií (v základním stavu). V základním stavu mají všechny elektrony nejbližší energetické hladiny patřící drahám s nejmenšími poloměry [15], [21].



obr.2.1 Dráhy elektronů atomu vodíku [15]

Kvantový charakter modelu atomu je v tom, že energie elektronu může dosahovat jen určité hodnoty (elektron se může nacházet jen na vymezených energetických hladinách). Změny energie elektronu nemůžou probíhat plynule. Elektron přeskočí z jedné energetické hladiny do druhé [15].

Slovo **LASER** je akronymem anglického **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, tedy zesílení světla stimulovanou emisí záření. K zesílení světla dochází opakovanými průchody fotonů médii se specifickými vlastnostmi. Obecně lze celé světelné spektrum (elektromagnetické spektrum, někdy zvané Maxwellova duha) považovat za elektromagnetické záření, které se šíří všemi směry. Laserové světlo má však jiné fyzikální vlastnosti a vzniká procesem stimulované emise záření. Tato stimulovaná emise záření může nastat při vzájemné interakci vybuzeného kvantového systému (atomu, iontu nebo molekuly) s elektromagnetickým zářením, jehož zprostředkovatel je foton. Laserové světlo tedy vzniká v prostředí stimulujícího elektromagnetického záření potlačením samovolné (spontánní) emise záření na úkor vynucené (stimulované) emise záření. Samovolná emise záření vzniká tak, že vybuzené atomy s vyšší energetickou hladinou E_2 se snaží zaujmout nižší, stabilnější energetickou hladinu E_1 a při tomto procesu se emituje (vyzáří) kvantum elektromagnetického záření s frekvencí ν [14], [15].

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad (2.1)$$

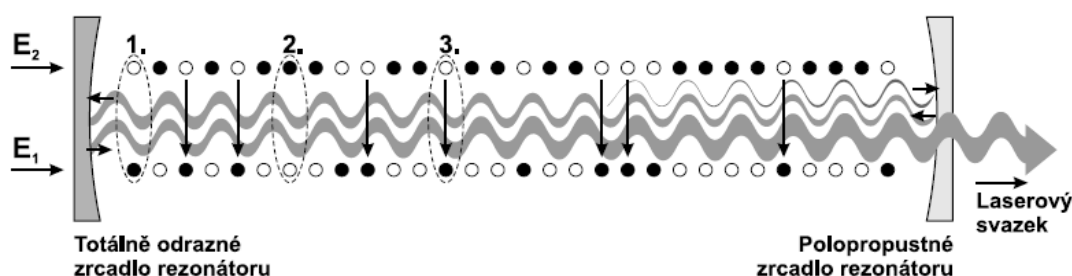
kde $h = 6,62606876 \cdot 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$ je Planckova konstanta, E_2 a E_1 jsou energetické hladiny kvantových soustav [J], ν je frekvence [Hz].

2.1 Princip laseru

V dnešní době existuje poměrně velké množství různých typů laserových generátorů. Každý laserový generátor obsahuje tři základní součásti. První součástí je laserové *aktivní prostředí*, ve kterém probíhá zesilování záření. Druhou součástí je *zdroj čerpání*, který excituje aktivní prostředí a třetí součástí je *rezonátor*, který vytváří zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím vedoucí ke vzniku laserových oscilací [30].

Obecný princip laseru spočívá v tom, že zdroj vybuzené (excitované) energie zajišťuje, aby se v aktivním prostředí nacházel dostatek kvantových soustav ve vybuzeném stavu. Tyto excitované kvantové soustavy přechází spontánní emisí na nižší energetickou hladinu a při tom uvolní kvantum elektromagnetického záření. Zprostředkovatelem elektromagnetického záření je elementární částice foton. Tento foton bude stimulovat další kvantové soustavy

k přechodu na nižší energetickou hladinu a emitují se další a další fotony. Část fotonů se může kvantovými soustavami opět absorbovat ve formě energie. Jestliže se v aktivním prostředí bude nacházet více kvantových soustav v excitovaném stavu (inverze populace hladin), tak se optické záření bude řetězovou reakcí zesilovat. Spontánní emise, tzn. samovolný přechod kvantových soustav na nižší energetickou úroveň, se stane zanedbatelnou vzhledem ke stimulované emisi. Takto generované záření bude koherentní (vlny emitované z různých míst aktivního prostředí mají pevný fázový vztah) a monochromatické. Pro zajištění směru laserového paprsku se aktivní prostředí formuje do tvaru dlouhého válce a je umístěno uvnitř optického rezonátoru. Rezonátor zajišťuje selektivní kladnou zpětnou vazbu, jen rezonující fotony se budou zesilovat. Po dostatečném zesílení je laserový paprsek vyveden z rezonátoru (obr.2.2) [30].



obr.2.2 Schéma optického rezonátoru [30]

Na obr.2.2 jsou vyznačeny tři kvantové soustavy. (1.) je kvantová soustava v základním stavu, (2.) je kvantová soustava v excitovaném stavu, (3.) je stimulovaná emise. E_1 a E_2 jsou energetické hladiny kvantových soustav [30].

Rezonátor (obr.2.2) je běžně tvořen dvěma rovinnými nebo sférickými zrcadly, která jsou umístěna proti sobě. Jedno zrcadlo je realizované s vysokým koeficientem odrazu a druhé je částečně propustné. Přes polopropustné zrcadlo část světelného svazku vychází ven ze soustavy jako laserový paprsek. Pokud je aktivní prostředí s inverzním obsazením hladin uzavřeno v optickém rezonátoru, zpětná vazba laserového záření (odraz zpět od aktivního prostředí) umožní generování elektromagnetických kmitů. Jestliže zesílení světla v aktivním prostředí překročí ztráty při jednom průchodu mezi zrcadly, začne laser emitovat záření s charakteristickou vlnovou délkou pro dané aktivní laserové prostředí [12], [30].

V rezonátoru dochází ke ztrátám energie vlivem odrazů fotonů od zrcadel. Další ztráty energie souvisí s rozptylem světla v aktivním prostředí a také s difrakcí (ohybem) světla. Základním cyklem práce takového laserového rezonátoru jsou dva po sobě jdoucí průchody světla aktivním prostředím a tomu odpovídající dva odrazy od zrcadel. Ztráty energie jsou

vyjadřované pomocí dvou efektivních koeficientů odrazu r_1 a r_2 . Do těchto koeficientů jsou zahrnuty ztráty energie způsobené odrazem fotonů od zrcadel, ztráty energie rozptylem světla a ztráty energie způsobené difrakčními jevy. Za jeden cyklus dojde ke dvěma odrazům světla a zesílení hustoty toku energie je přímo úměrné součinu r_1 a r_2 . Světlo za tento cyklus urazí vzdálenost $2L$ [12]. Podle Burgerova zákona zesílení bude hustota toku energie následující:

$$\sigma = \sigma_{01} \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \exp(2 \cdot \alpha \cdot L) \quad (2.2)$$

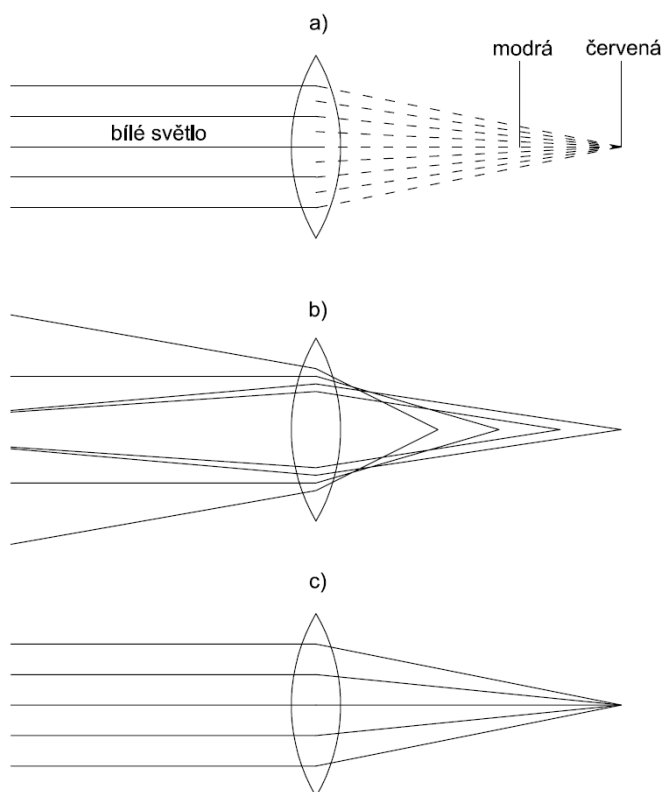
Kde σ_{01} je hodnota toku energie na začátku cyklu, přičemž za začátek cyklu můžeme uvážit libovolný časový okamžik. Ke generaci laserového záření může docházet jen když $2\alpha L > 2f$. To znamená, že k vyvážení laserového paprsku dochází, když energie světelného paprsku, získaná z aktivního prostředí principem stimulované emise, převyší energii ztrátovou. Z exponentu vyplývá, že pokud má dojít k zesílení světla, musí platit $2\alpha L = 2f$, nebo $\alpha_0 L = f$. Energie záření, získaná z aktivního prostředí mechanismem excitování atomů, musí být minimálně rovná ztrátám f . Koeficient zesílení α_0 se nazývá *práh generace*. Při stacionárním režimu generace jsou ztráty energie kompenzované na úkor energie získané světelným svazkem z aktivního prostředí. Stacionární režim generace záření je potom určený při hustotách úměrných toku energie, kterému koreluje určitý koeficient zesílení α [5], [12]. Podmínka pro případ stacionárního režimu tedy je:

$$\alpha \cdot L = f \quad (2.3)$$

2.2 Fyzikální vlastnosti laserového paprsku

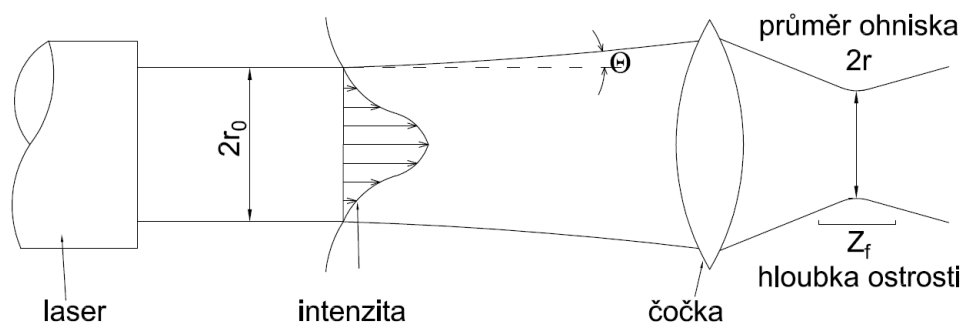
Laser je tedy kvantově elektronický zesilovač a generátor světelných vln. Využívá stimulovanou emisi záření na produkci laserového paprsku, který má tyto základní vlastnosti:

1. Je vysoce monochromatický – světlo v laserovém paprsku má prakticky jen jednu vlnovou délku (obr.2.3), [14].



obr.2.3 Porovnání zaostření bílého a laserového světla [14]

- a) Fokuse bílého světla – každá barva má jinou ohniskovou vzdálenost od čočky.
 - b) Fokuse neparalelního světla – ohnisková vzdálenost závisí na úhlu dopadu částic paprsku.
 - c) Laserové světlo je monochromatické a rovnoběžné, tím pádem ho lze soustředit do intenzivního úzkého bodového svazku.
2. Má vysoký stupeň prostorové a časové koherence. U prostorové koherence paprsku kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku, tj. mají pevný fázový vztah. U časové koherence paprsku kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází ve směru šíření paprsku. S tím je spojena vysoká přesnost frekvence záření (obr.2.4), [14].



obr.2.4 Rozbíhavost, prostorový profil a fokusace charakteristického laserového paprsku [14]

3. Má minimální divergenci (rozbíhavost) Θ [rad], charakterizovanou poloviční hodnotou vrcholového úhlu kuželu, který vystupuje z rovinného okénka laseru s průměrem $2r_0$ [14]. Divergence laserového paprsku s vlnovou délkou λ je dána vztahem:



















$$\theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot r_0} \quad (2.4)$$

4. Má vysokou hustotu energie neboli intenzitu záření I [W.cm⁻²], která není limitovaná zákony záření absolutně černého tělesa [14]. Pro intenzitu záření laserového paprsku platí vztah:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{r_0^2}\right) \quad (2.5)$$

Kde I_0 je intenzita záření ve středu paprsku, r_0 je poloměr, ve kterém je intenzita redukována ze střední hodnoty faktorem e^2 .

5. Má módobou strukturu TEM (Transverse Electromagnetic Mode). Jedná se o příčný průřez paprskem, kdy se vytváří jednoduchá stopa – základní mód, anebo složitější obrazce, které jsou kruhově symetrické. Je to dáno tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci – mód. Tento mód závisí na vlnové délce fotonů, souososti, vzdálenosti a zakřivení zrcadel a od průměru laserové trubice (u CO₂ laseru výbojové trubice). Nejvyšší hustoty energie (intenzity záření) při dané výstupní energii laseru lze dosáhnout lasery, které pracují v základním módu označovaném TEM₀₀. (index charakterizuje symetrii elektromagnetického pole v rovině kolmé na směr šíření paprsku). Mód laseru určuje jeho vhodnost pro průmyslové použití, např. pro řezání, svařování, značení laserem a další technologie [14], [15]. Ukázky módové struktury jsou na obr.2.5.

průřez A v rovině kolmé na směr paprsku	průřez B kolmý na A	půdorys	označení TEM (použití)
1 			TEM ₀₀ , Gauss (řezání)
2 			TEM ₀₁ (svařování, kalení)
3 			TEM ₂₁
4 			TEM ₃₂ (málo používané)
5 			multimód (řezání)
6 			multimód (nevhodné pro řezání)

obr.2.5 Ukázky módové struktury laserů a jejich TEM označení [14]

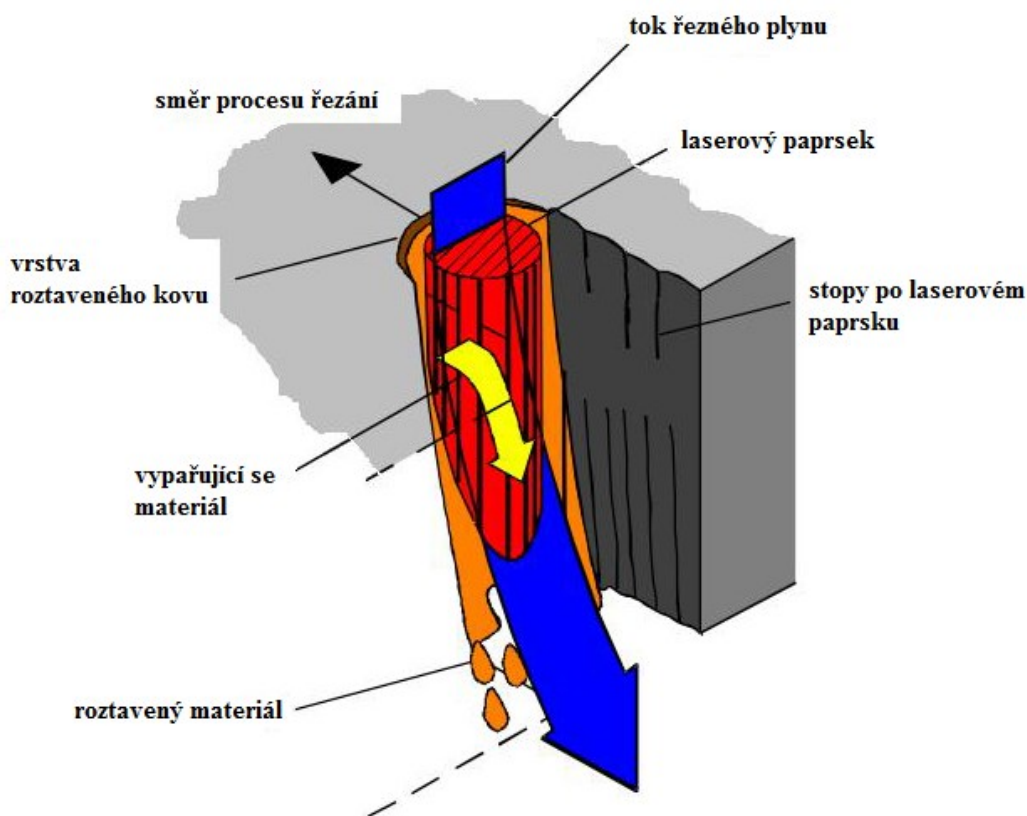
Základní mód rezonátoru je TEM₀₀ – rozložení energie je v příčném směru osově symetrické. Intenzita záření měřená kolmo k optické ose vykazuje jedno maximum uprostřed. Rozložení energie svazku má tvar Gaussovy křivky. TEM₀₀ je z hlediska praktických aplikací velmi důležitý, protože má nejmenší divergenci a vytváří stopu s velmi malým průměrem a velkou intenzitou záření. Vhodný je na vrtání, řezání a svařování. TEM₀₁ má ve svazku dvě maxima. U módu P₀₁ energie vychází ve tvaru prstence s energií soustředěnou na obvodě fokusovaného svazku. Používá se při technologiích povrchových úprav [15].

3 Technologie řezání laserovým paprskem

Technologie řezání materiálů laserem se ve strojírenském průmyslu používá již zhruba 30 let. Přestože se stále řadí mezi speciální nebo nekonvenční technologie obrábění, je dnes využívána pro výrobu širokého spektra produktů z plechu. Výhodou této technologie je možnost výroby tvarově složitých dílů, vysoká rozměrová přesnost, jednoduché zanesení změn a inovací, velká využitelnost materiálů a další. Princip řezání laserovým paprskem spočívá ve fokusaci laserového paprsku na povrch obrobku. Z důvodu vysoké hustoty energie laseru se vyvine na povrchu obrobku velmi vysoká teplota, která řezaný materiál roztaví nebo odpaří. To záleží na intenzitě laserového paprsku [12], [17]. Srovnání hustot energie s jinými metodami řezání materiálu je v tab.3.1 a schéma řezání laserovým paprskem je na obr.3.1.

tab.3.1 Porovnání metod a jejich hustot energie

Metoda	Hustota energie [W/cm ²]
Laser	10^7 - 10^9
Plamen	10^3
Plazma	10^6
Vodní paprsek	10^{10}



obr.3.1 Schéma řezání laserovým paprskem [22]

3.1 Tavné řezání

Řezaný materiál se lokálně nataví a je z řezné spáry vyfukován inertním plynem. Základní materiál je nataven pouze z energie laserového paprsku, což v porovnání s oxidačním řezáním limituje řeznou rychlost. Tento způsob se používá zejména k vytváření kvalitních a nezoxidovaných řezů např. nerezových ocelí a barevných kovů. Při použití dusíku o vysoké čistotě jako inertního plynu můžeme dosáhnout v místě řezu kvalitního, lesklého povrchu řezných ploch, které nevyžadují následující dokončovací úpravy [5].

3.2 Oxidační řezání

Zde pracovní plyn není inertní, ale je v něm obsažen i kyslík. Natavený kov je také z řezné spáry vyfukován, ale zároveň částečně shoří v proudě kyslíku. Tato exotermická reakce dodává další energii do místa řezu, což zvyšuje účinnost řezného procesu. Řezná spára je širší a s nižší kvalitou povrchu. Metoda vhodná pro dělení konstrukčních uhlíkových ocelí do tloušťky 25 mm [5].

3.3 Sublimační řezání

Materiál se působením vysoce koncentrované energie laserového paprsku z místa řezu odpařuje. Přiváděný inertní plyn odvádí vzniklé páry. Nevýhodou je vysoká požadovaná energie pro odpaření měrného objemu materiálu. Vzniká kvalitní úzký řez. U materiálů s tekutou fází je možno řezat maximální tloušťku přibližně rovnající se průměru paprsku. Při jejím překročení mohou páry kovu zkondenzovat a vytvořit svarový spoj. Proto je metoda vhodná pro tenké kovové fólie a nekovové materiály [5].

3.4 Řezání Microjet

Microjet je speciální technologie řezání laserem. Laserový paprsek je až do místa řezu veden proudem vody. Vodní sloupec vede laserový paprsek podobně jako je tomu při jeho klasickém vedení optickým vláknem. Celá tato metoda má proti běžnému laserovému řezání celou řadu výhod, kterými jsou zejména dokonalejší chlazení obrobku, dosažení vyšších řezných rychlostí a naprosto paralelní stěny řezu při trvale zaostřeném paprsku. V důsledku vzniku minimální tepelně ovlivněné oblasti se takto řezou například solární články nebo malé, tvarově složité obrobky [28].

3.5 Interakce laserového paprsku s materiálem

Při dopadu laserového záření na obráběný materiál dochází nejdříve k interakci s povrchem materiálu a poté s jádrem materiálu. Energetickou bilanci při interakci laserového záření s materiálem lze vyjádřit kvantitativně

$$(1 - k_r) \cdot P \cdot \tau = \gamma \cdot V \cdot [c_p \cdot (T_t - T_o) + (T_v - T_o)] + L_t + L_v + E_r + E_z \quad (3.1)$$

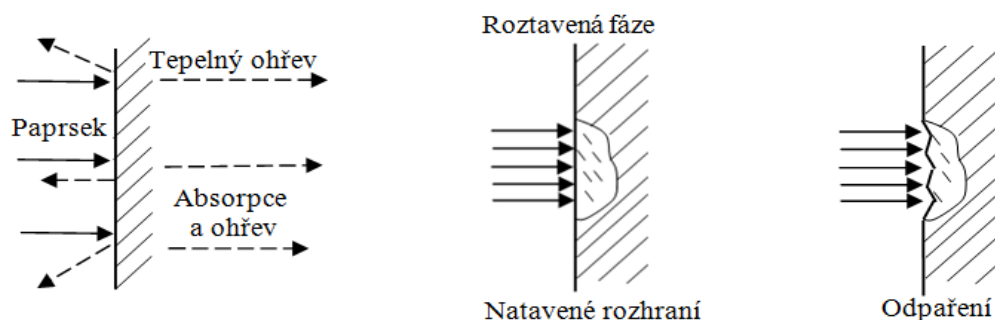
kde k_r je koeficient odrazu [-], P je výkon laseru [W], τ je doba působení [s], γ je měrná hmotnost materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], V je objem materiálu [m^3], c_p je měrné teplo [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], T_t je teplota tavení [K], T_o je teplota okolí [K], T_v je teplota vypařování [K], L_t je latentní teplo tavení [J], L_v je latentní teplo vypařování [J], E_r je reakční energie v okolí materiálu [J], E_z je ztrátová energie, která se rozptýlí [J], [12].

Z rovnice (3.1) vyplývá, že důležitou úlohu pro energetickou bilanci má koeficient odrazu k_r . Koeficient odrazu představuje část energie, která se při dopadu záření na povrch materiálu odrazí. Koeficient odrazu lze vyhodnotit

$$k_r = \frac{E_r}{E_o} = \frac{I_r}{I_o} \quad (3.2)$$

kde E_r je energie odraženého záření [J], I_r je intenzita odraženého záření [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$], E_o je energie dopadajícího záření [J], I_o je intenzita dopadajícího záření [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]. Koeficient odrazu k_r je funkcí vlnové délky laserového záření λ , použitého materiálu a drsnosti povrchu [12].

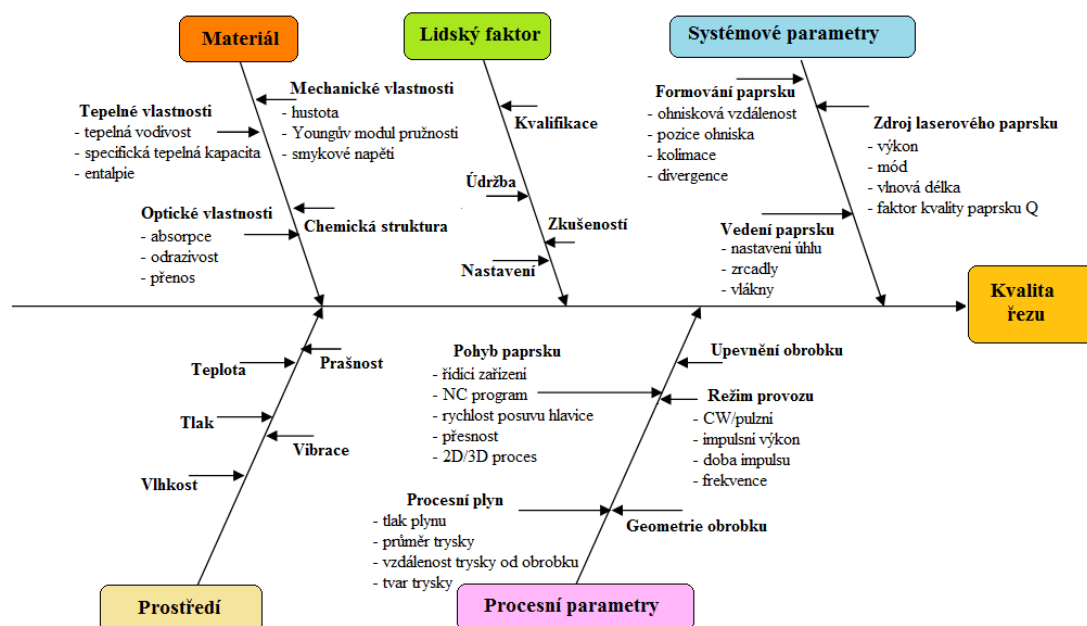
Při dopadu laserového záření na obráběný materiál se část energie odrazí a část je materiálem absorbována. Tato absorbovaná energie poměrně intenzivně zahřívá materiál. Jestliže laserový paprsek působí na materiál, energie tohoto záření je absorbována nejprve volnými elektrony a potom je přenesena do krystalové mřížky. Různé materiály mají různé absorpční schopnosti k laserovým paprskům o různých vlnových délkách. Závislost absorpce na vlnové délce je dána mikrostrukturou a elektromagnetickými vlastnostmi materiálu. Fotony laserového záření nemohou přímo reagovat s atomy na povrchu materiálu, protože mají příliš vysokou frekvenci. Reagují tedy s valenčními elektrony a s krystalickou mřížkou, tím se zvyšuje počet volných iontů a krystalická mřížka se zahřívá [12]. Na obr.3.2 Je zachycen účinek laserového paprsku při dopadu na povrch materiálu.



obr.3.2 Interakce laserového paprsku s materiálem

3.6 Technologické faktory ovlivňující kvalitu řezu

Na kvalitu řezu při řezání laserovým paprskem má vliv několik technologických faktorů. Od 90-tých let minulého století, bylo provedených mnoho studií, zaměřujících se na vliv řezných parametrů na kvalitu řezu. Kvalita procesu řezání laserovým paprskem a následně výsledná kvalita řezu je ovlivňována množstvím parametrů, které souvisí s laserovým systémem, materiálem a procesem (obr.3.3) [14].



obr.3.3 Ishikawův diagram pro technologii laserového řezání [7]

Výstupní kvalita řezné stěny závisí na množství zmíněných faktorů. Tyto faktory lze rozdělit na přímé a nepřímé. Přímé faktory vycházejí z konkrétního nastavení řezného procesu (procesní parametry). Nepřímé faktory jsou dány technologickou soustavou (systémové parametry). Při řezání specifického materiálu s použitím konkrétního laserového

systemu mohou být procesní parametry měněny obsluhou laseru. Systémové parametry, které jsou charakteristické pro konkrétní laserový systém nelze během procesu řezání měnit.

4 Typy laserů

V dnešní době existuje velké množství různých typů laserů. Základní princip generování laserového záření je stejný, ale konstrukce, typy aktivních prostředí, režimy generování laserového paprsku, využití a další vlastnosti se liší. Různí autoři dělí lasery do různých skupin. Lasery lze dělit podle:

- **skupenství aktivního prostředí** – na lasery pevnolátkové, kapalinové, plynové plazmatické a zvláštní skupinou jsou lasery polovodičové – laserové diody [30];
- **režimu generace laserového paprsku** – na lasery kontinuální a pulzní. Pulzní lasery se mohou dále dělit na lasery pracující v režimu volného generování (délka impulsů řádově 10^{-4} s), lasery pracující v režimu spínání zisku (často označované jako Q-spínání, délka impulsů řádově 10^{-8} s), lasery pracující v režimu synchronizace módů (délka impulsů řádově 10^{-12} s) [30];
- **způsobu čerpání** – na lasery opticky čerpané (koherentně nebo nekoherentně), lasery čerpané elektrickým výbojem, lasery čerpané chemickou reakcí, lasery čerpané elektronovým svazkem atd. [30];
- **frekvenční oblasti, ve které je laserové záření generované** – na lasery submilimetrové, infračervené, viditelné, ultrafialové, rentgenové [30];
- **prostorové struktury laserového svazku** – na jednomódové a mnohamódové lasery [30];
- **rozsahu generovaných frekvencí** – na jednofrekvenční a přeladitelné lasery [30];
- **využitých nelineárních jevů** – na lasery generující na vyšší harmonické frekvenci, lasery se směřováním frekvencí, lasery Ramanovské atd. [30].
- **dosahovaného výkonu** – na nízkovýkonové ($0,1\text{W} \div 100\text{W}$) a vysokovýkonné ($1\text{kW} \div 30\text{kW}$) [14];

Uvedené skupiny dělení se neustále mění a doplňují, a to podle toho, jak jsou realizovány nové typy laserů. Objevuje se dělení podle konstrukce samotného laserového zařízení, využití a aplikace laserů a mnohé další. Jediné relativně univerzální dělení je dělení podle skupenství aktivního prostředí.

4.1 Pevnolátkové lasery

Aktivní prostředí této skupiny laserů tvoří pevné krystalické nebo amorfní látky dopované příměsí vhodných iontů. Pevná fáze v těchto případech tvoří vlastně jen nosič

aktivního prostředí. K optickému zesilování světla dochází na přechodech elektronů energetických hladin iontů příměsí. Koncentrace těchto iontových příměsí jen málokdy překročí 1% [6].

U krystalických materiálů jsou aktivní ionty součástí krystalografické mřížky a mají stálou, orientovanou polohu v silovém poli mřížky. Důležitá je anizotropie krystalů, což znamená, že optické a mechanické vlastnosti jsou směrově závislé. Z toho vyplývá, že pokud je jako aktivní prostředí použita krystalická látka obohacená vhodnými ionty, musí být krystal přesně orientován podle optických os. Vhodné příměsí aktivních prostředí jsou ionty prvků ze skupiny vzácných zemin (Nd^{3+} , Sm^{2+} , Tm^{3+} , Pr^{3+} a jiné) nebo ionty prvků 6. skupiny Mendělejevovy periodické tabulky (zejména Cr^{3+} a U^{3+}). Tyto ionty jsou v krystalu vázány poměrně silnými kovalentními vazbami. Tyto vazby mohou ovlivnit energetické hladiny valenčních elektronů, čímž dochází k posunu, štěpení a rozšiřování energetických hladin [6].

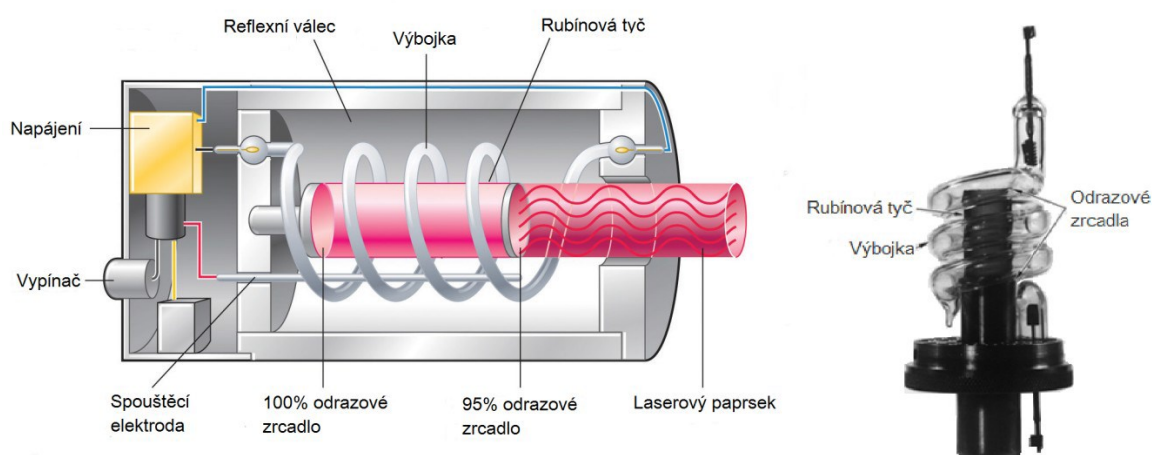
U amorfních materiálů (skel) jsou aktivní ionty rovnoměrně rozptýleny. Mezi ionty patří převážně Nd^{3+} , Ho^{3+} , Gd^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+} . Vlivem homogenního rozptýlení iontů ve skelných materiálech jsou tyto materiály izotropní a jejich optické a mechanické vlastnosti nezávisí na prostorové orientaci materiálů. Energetické hladiny iontů jsou i v tomto případě silně ovlivněny interakcemi se stavebními kameny amorfních nosných skeletů [6], [24].

4.1.1 Rubínový laser

Základním reprezentantem pevnolátkových laserů je rubínový laser, který je zároveň první fungující laser vůbec (realizace panem T. H. Maimanem v roce 1960). K jeho stavbě přispěla zkušenost s optickými vlastnostmi korundu (oxidu hlinitého, Al_2O_3) a poznatky o technologii přípravy jeho monokrystalu. Rubín se od korundu liší jen příměsí asi 0,05 % chromu. Monokrystaly rubínu se získávají z taveniny Al_2O_3 s příměsí sloučenin trojmocného chromu pozvolným ochlazováním. Surový monokrystal má tvar protáhlého roubíku, z kterého se vybrousí tyčinka. Konce této tyčinky se podle potřeby zabrousí kolmo k podélné ose nebo pod Brewsterovým úhlem [6].

K optickému zesilování v rubínu dochází mezi energetickými hladinami trojmocného chromu v Al_2O_3 . Emisní spektrum rubínového laseru je poměrně složité. Jde o generaci na energetickém přechodu končícím na rozštěpené hladině a generuje se také mnoho vyšších módů. Samotná emisní šířka laserových čar je značná (při teplotě 300 K dosahuje hodnoty 30 až 100 GHz, při teplotě 77K vede k zúžení na úroveň 1 až 3 GHz). Vlnová délka

rubínového laseru je 694,3 nm (obr.4.1). Rubínový laser pracuje především v pulsním režimu při buzení pulsní xenonovou výbojkou. Délka pulsu je přibližně 1 ms. Pro zlepšení činnosti rubínového laseru se používá modulace činitele jakosti rezonátoru. Při takové úpravě lze získat puls o maximálním pulsním výkonu přes 10^{12} W při délce pulsu pod 10^{-9} s. I přes velkou kvantovou účinnost je celková účinnost rubínového laseru malá. K buzení je zapotřebí poměrně velké množství energie. U rubínového laseru se nepříznivě projevuje zvýšení teploty aktivního prostředí, což má za následek zvýšenou neužitečnou relaxaci excitovaných stavů. Teplota krystalu se zvyšuje převážně absorpcí infračerveného záření xenonové výbojky. Další faktor který ovlivňuje teplotu krystalu je energie z nezářivých relaxačních procesů. Z tohoto důvodu se někdy doporučuje použít při konstrukci rubínového laseru účinné chladicí zařízení a filtry pro odstínění záření z výbojky [6].



obr.4.1 Rubínový laser zkonstruovaný Theodorem H. Maimanem [31]

4.1.2 Nd – YAG laser

Nd-YAG laser se skládá z pevného $Y_3Al_5O_{12}$ (yttrium aluminium granát). Je to izometrický krystal, který obsahuje asi 1 % Nd^{3+} (iontů neodymu). Poprvé byl tento laser popsán v roce 1964. Tepelná vodivost tohoto krystalu je asi 10 krát lepší než tepelná vodivost skla, které se používá u Nd – sklo laseru. Ionty neodymu tvoří oscilační médium a zároveň aktivní prostředí. Tento laser generuje elektromagnetické záření o vlnové délce 1064 nm v kontinuálním i pulsním režimu. S menší účinností pak generuje záření o vlnové délce 1320 nm. Metodami nelineární optiky lze dosáhnout záření o vlnové délce 532 nm (druhá harmonická frekvence – SGH), popřípadě 355 nm nebo 266 nm (třetí a čtvrtá harmonická frekvence). Při generování záření o vlnové délce 1064 nm dosahuje Nd – YAG laser nejvyšších výkonů. Výkonová hladina laseru při vlnové délce 1064 nm je od několika stovek do tisíce wattů. Pracuje v pulsním režimu s energií impulzu 1 až 50 J nebo

v kontinuálním režimu s energií impulzu 1 až 5 mJ a rychlostí spínání 1 až 50 kHz. Trvání impulzu v pulzním režimu pro průmyslové využití je 0,6 ms. Pro ultrapřesné odstraňování tenkých vrstev z keramických materiálů (mikroobrábění) se používají velmi krátce trvající impulzy v nano a piko sekundách. Nd – YAG laser se využívá pro laserové obrábění, značkování, vrtání a svařování. Jeho výhodou je stabilita aktivního prostředí. $Y_3Al_5O_{12}$ je velmi stabilní krystalická látka, která má výborné akumulární schopnosti, což umožňuje generovat krátké vysokovýkonné pulzy [12], [14]. V tab.4.1 je uvedeno porovnání CO₂ a Nd – YAG laseru.

tab.4.1 Porovnání CO₂ laseru a Nd – YAG laseru [14]

	CO₂ laser	Nd – YAG laser
Vlnová délka	10,6 μm	1064 nm
Aktivní prostředí	CO ₂ plyn	$Y_3Al_5O_{12}$ obohacený 1% Nd ³⁺
Zdroj excitace	výboj	magneziové světlo
Řízení pohybu paprsku	odrazová zrcadla, pevné čočky	flexibilní přes čočky, zrcadla, optické kabely
Maximální hustota toku energie	10,7 W/cm ²	10,9 W/cm ²
Průměr paprsku	100 μm	15 μm
Šířka řezu	2000 μm	30 μm
Elektrická účinnost	8 až 10 %	3 až 4 %
Střední výkon laseru	50 až 50000 W	20 až 3000 W
Mód paprsku	TEM ₀₀	Multimód
Kvalita paprsku	optimální	slábne při vysokém výkonu
Přesnost	střední	vysoká
Doporučené aplikace	řezání, svařování, tepelné zpracování povrchu a jiné povrchové úpravy	řezání, vrtání, svařování, tepelné zpracování povrchu

4.1.3 Nd – sklo laser

První laser z neodymového skla byl sestaven C. G. Youngem v roce 1963. Nosný materiál tvořilo barytové sklo (59% SiO₂, 25% BaO, 15% K₂O a 1% Sb₂O₃), dopované Nd₂O₃ v koncentracích mezi 0,1 až 2% [6].

Aktivní prostředí v tomto laseru tvoří amorfni materiál – sklo, v němž jsou rozptýleny ionty Nd³⁺. Při výrobě se neodym do skla dostává nejčastěji v podobě oxidu Nd₂O₃ v koncentraci zhruba 2%. Předností tohoto materiálu v porovnání s krystaly je mnohem jednodušší výroba oproti technologii výroby monokrystalů. Další výhodou je, že skleněný materiál lze zpracovávat v téměř neomezené rozmanitosti tvarů a velikostí. Vzhledem k dobré optické homogenitě skel bývá účinnost laserů s aktivním prostředím s amorfni

strukturou větší než účinnost laserů s aktivním prostředím z krystalu. Nevýhoda tohoto laseru je malá tepelná vodivost skel. Lasery z dopovaných skel se nehodí pro generaci pulsů s vysokou opakovací frekvencí nebo pro kontinuální režim. Vlnová délka laseru Nd – sklo je stejná jako u Nd – YAG laseru a to 1064 nm [6], [24].

4.2 Plynové lasery

S velikou rozmanitostí se setkáváme u laserů, jejichž aktivní prostředí je tvořeno plynem nebo směsí plynů. Jde o nejširší skupinu laserů s možností generovat záření v celém optickém spektru. Plynný stav je možno charakterizovat jako soubor částic s kvantovanými energetickými hladinami s malou vzájemnou interakcí (částice v plynném stavu při atmosferickém tlaku absolvuje zhruba 10^7 srážek za sekundu a doba vzájemné interakce je obvykle menší než 10^{-12} s). Částice jsou v neustálém, neuspořádaném pohybu (Brownův pohyb) a to se projevuje na povaze emisních a absorpčních čar [6].

Plynové lasery pracují hlavně v kontinuálním režimu, ale existují i výkonné pulzní plynové lasery. Velkou výhodou plynových laserů je vysoká účinnost laserového systému pohybující se v desítkách procent (CO₂ laser – 40 %).

4.2.1 CO₂ laser

První CO₂ byl objeven v roce 1964 panem C. K. M. Patelem. U CO₂ laserů se k zesilování využívá přechodů mezi vibračními hladinami molekuly, takže laser generuje záření v infračervené oblasti spektra [6]. CO₂ laser patří mezi lasery s nejvyššími dosahovanými výkony. Výkon CO₂ laseru může být až desítky kW ve vzdálené infračervené oblasti (10,6 μ m). Je to typický laser pro technologické aplikace (řezání, svařování, žíhání). Ke stimulované emisi záření dochází při kvantových přechodech mezi rotačně-vibračními hladinami základního elektronového stavu molekuly CO₂. Atomy helia podporují vyprazdňování spodní laserové hladiny. Ke světoznámým výrobcům CO₂ laserů patří německá firma TRUMPF a Rofin-Sinar, jejichž výrobní program zahrnuje řadu typů laserových systémů až do výkonu 20 kW. Zajímavou novou technologií řezání křehkých materiálů (sklo, keramika nebo polovodiče) tímto laserem umožňuje laser Jenoptik – Votan G, který využívá k řezání vnitřní napětí materiálu. Patentovaný způsob, označovaný TLS (Termisches Laserstrahl Separieren) je rychlejší než ostatní postupy a na rozdíl od klasického laserového dělení poskytuje povrch řezu bez mikrotrhlinek. Od firmy Ronin - Sinar pocházejí kompaktní "slab CO₂" lasery, dosahující vysokou kvalitu paprsku. Jsou vhodné pro jakostní řezy a nevnaší do materiálu tolik energie ve formě tepla. Teplem

ovlivněné oblasti jsou tedy menší. Pro tyto lasery jsou charakteristické velkoplošné měděné elektrody s účinným způsobem chlazení. Dosahují výkon do 8 kW. Tyto lasery jsou vhodné pro mikrořezání a při jejich daném výkonu se přesnost přenáší i na řezání tlustých plechů. Vysoká stabilita procesu a kvalita paprsku poskytují možnost využívat při řezání i vyšších řezných rychlostí [12].

4.2.2 Helium – neonový laser

První He – Ne laser vznikl v roce 1960. S jeho objevem jsou spojeny jména A. Javana, W. R. Benneta a D. R. Herriotta. Zajímavostí je, tento první He – Ne laser generoval záření z blízké infračervené oblasti s vlnovou délkou 1150 nm. Během prvních dvou let od objevu byla s pomocí He – Ne laseru dosažena generace na více než čtyřiceti přechodech s vlnovými délkami od 0,63 do 12 μm . Dnes je množství laserových přechodů, pokud zahrneme i přechody v ionizovaném neonu, mnohem větší. Při popisu energetických hladin, mezi kterými dochází k inverzní populaci, je nutno zdůraznit, že se všechny týkají atomů neonu. Z toho vyplývá, že neon je z obou plyných komponent aktivního prostředí He – Ne laseru nositelem zesílení [6].

V současné době mají největší praktický význam tři přechody neonu s vlnovými délkami $\lambda_1 = 633 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1152 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 3391 \text{ nm}$. λ_1 leží v červené oblasti viditelného spektra, λ_2 a λ_3 leží v blízké infračervené oblasti. Přechod λ_3 je velmi intenzivní a poskytuje velké zesílení. Využití helium – neonových laserů je v oblastech, kde nejsou zapotřebí vysoké výkony, např. spektroskopie, metrologie, zaměřování polohy [12], [24].

4.2.3 Argonový laser

Dalším reprezentantem plynových laserů je argonový iontový laser. Je to nejvýkonnější laser generující záření ve viditelné oblasti spektra. Jednou z podmínek vytvoření inverzní populace v argonu je velká hustota počtu budících elektronů. Pro excitaci horní laserové hladiny v ionizovaném argonu je potřeba energie 21 až 23 eV. To je příliš velká energie pro jednotlivé elektrony ve výboji. Proto byl navržen mechanismus excitace, využívající několikastupňové, kaskádní excitování. Z tohoto důvodu se pro buzení argonového laseru používá výboj s velkou hustotou počtu elektronů. Zvýšenou hustotou počtu elektronů dochází k četnosti srážek potřebných pro kaskádní buzení [6].

V dnešní době se argonové lasery využívají v oftalmologii a spektroskopii. Dosahují vlnových délek 488 nm a 514 nm v modré a zelené oblasti viditelného spektra [24].

4.2.4 Dusíkový laser

Tento laser je nejjednodušší z plynových laserů. Byl objeven v roce 1964 panem C. G. Heardem. Jako laserové aktivní prostředí slouží molekulární dusík, ale ke generaci stačí i vzduch, který obsahuje kolem 80% dusíku. Molekula N_2 může být využita ke generaci záření na několika přechodech. Tento laser se nejvíce využívá pro generaci ultrafialového záření s vlnovou délkou 337nm. Laser pracuje v pulsním režimu s délkou impulsů několik ns [6].

4.3 Polovodičové lasery

V dnešní době je tato skupina laserů nejrozšířenější. Používá se pro ně označení diodové lasery (HDL, high – power diode laser). Princip ve vytváření laserového záření se od ostatních laserů liší tím, že nepracují s přechodem elektronů mezi diskrétními hladinami, ale pracují s přechodem elektronů mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. V podstatě mění elektrický proud přímo na elektromagnetické záření. Laserové diody mají velmi malé rozměry. To má za následek větší divergenci výstupního svazku fotonů oproti jiným laserům. U polovodičových laserů lze laserový paprsek snadno modulovat změnou budícího elektrického proudu. Mají vysokou účinnost (až 50 %). Pracují v kontinuálním i pulzním režimu a mohou dosahovat vysokých výkonů [12], [30].

Diodové lasery mají širokou škálu aplikací. V průmyslu záleží na jejich výkonu, který se pohybuje od několika wattů po kilowatty. Diodové lasery s nízkým výkonem se používají především pro telekomunikaci nebo počítačové technologie. Vysokovýkonné diodové lasery se používají pro svařování, pájení a aplikace tepelného zpracování. Dnes se také stále častěji používají pro čerpání pevnolátkových laserů a tak vznikají vysoce výkonné flexibilní a miniaturní laserové generátory [36].

4.4 Excimerové lasery

Tyto lasery by se dali zařadit mezi plynové nebo chemické lasery. Plynové proto, že jako aktivní prostředí se využívají směsi vzácných plynů s halogeny. Chemické proto, při excitaci a generaci laserového paprsku dochází k tvorbě a rozpadu chemických vazeb (iontových vazeb). Excimer je zkratka pro *excitovaný dimer*. Podstata excimeru spočívá v tom, že k vytvoření iontové vazby dojde u některých prvků pouze v excitovaném vztahu. Iontová vazba je druh vnitromolekulární chemické vazby a vzniká v případě, že rozdíl elektronegativit atomů účastnících se vazby, přesahuje 1,67. Pokud by atomy vzácných

plynů byli v základním energetickém stavu, tak by nikdy nereagovaly a nevstupovaly do chemické reakce. Tuto problematiku objasňuje teorie hybridizace, teorie VSEPR (Valence Shell Electron Pair Repulsion) a Pauliho vylučovací princip. Atomy vzácných plynů mají atomové orbitály zcela zaplněny valenčními elektrony. Při přibližování dvou atomů neustále roste potenciální energie, která nemá nikde minimum. Jedná se o repulzní křivku. Naproti tomu, excitované atomy vzácných plynů mohou vytvářet s jinými atomy chemicky vázaný dimer – excimer (existuje potenciálové minimum) [6], [20].

Excimerové lasery patří mezi lasery s krátkou vlnovou délkou a vytváří světelné záření v ultrafialové oblasti a částečně v oblasti rentgenového záření. Pracují v pulsním režimu s energií impulsu 2 až 8 J.cm⁻². Nejznámějšími excimerovými lasery jsou lasery se směsí vzácných plynů a halogenů. Hlavní představitel je laser s aktivním prostředím obsahující KrF (fluorid kryptonu). Patří do kategorie vysokorychlých laserů s ultrakrátkým trváním impulsu udávaným v pikosekundách (1ps = 10⁻¹²s) nebo femtosekundách (1fs = 10⁻¹⁵s). Excimerové lasery patří mezi lasery s nejkratšími možnými impulzy světelného záření. V průmyslu se objevily až na konci 20. Století, a to zejména pro zpracování keramických a kompozitních materiálů, pro oblast mikroobrábění tenkých kovových profilů, pro označování kovových předmětů, na odstraňování nadbytečných materiálů na plošných spojích bez poškození okolí, při mikrořezání měkkých a tvrdých biologických tkání v medicíně [14]. V tab.4.2 je uvedeno porovnání CO₂ a excimerového laseru.

tab.4.2 Porovnání CO₂ laseru a excimerového laseru [14]

	CO₂ laser	Excimerový laser
Vlnová délka	10,6 μm	193 – 351 nm
Kontinuální režim - střední výkon	< 1500 W	< 150 W
Pulzní režim - střední výkon	≤ 5 · 10 ³ W	< 10 ⁷ W
Průřez paprsku	250 mm ²	100 mm ²
Divergence paprsku	1,5 mrad	≤ 5 mrad
Mód paprsku	TEM ₀₀	multimód
Pulzní frekvence	≤ 2,5 kHz	≤ 0,8 kHz
Trvání impulsu	10 μs	10 – 80 ns
Účinnost	10 – 30 %	1 %
Rychlost posuvu při řezání kompozitních materiálů	9 m/min pro 500 W 3 m/min pro 1000 W	0,9 mm/min pro 1,1 W

4.5 Kapalinové (barvivové) lasery

Aktivní prostředí kapalinových laserů tvoří roztoky organických barviv. Objev laserového efektu v roztocích je datován k roku 1966, kdy se objevily práce P. P. Sorokina a J. P. Lonkarda na jedné straně a F. P. Schäfera, W. Schmidta a I. Volseho na straně druhé.

Molekuly organických barviv jsou složité a jejich velký počet vibračních pásů, rozšířený interakcí s molekulami rozpouštědel, vytváří široký fluorescenční pás, posunutý ve srovnání s absorpčním pásem k větším vlnovým délkám. Excitace kapalinových laserů je optická. V současné době existuje několik set organických barviv, u kterých lze dosáhnout inverzní populace hladin. Jejich absorpční pásy leží většinou ve viditelné a ultrafialové oblasti spektra. U každého druhu organického barviva jsou odlišné excitační, provozní a emisní podmínky. Hrubého nastavení vlnové délky emitovaného záření je možno dosáhnout vhodnou volbou barviva. K jemnému nastavení vlnové délky emitovaného záření se využívá rozpouštědlový efekt [6]. V tab.4.3 je ukázka závislosti vlnové délky fluorescence na použitém rozpouštědle.

tab.4.3 Vliv rozpouštědel na vlnovou délku fluorescence roztoků 2,2-p-fenylbis-(5fenyloxazolu) [6]

Použité rozpouštědlo	λ [nm]
Dimethylformamid (C_3H_7NO)	428 - 430
Etanol (C_2H_6O)	421
1,4-dioxan ($C_4H_8O_2$)	416 - 418
Polymethylmetakrylát ($C_5O_2H_8$) _n	415
Toluen (C_7H_8)	412 - 431

Pomocí metod nelineární optiky a několika typů barviv je možné spojitě pokrýt pásmo vlnových délek od 300 nm do 1500 nm. Typický představitel kapalinových laserů je rhodamonový laser. Tento laser generuje pulsní záření o vlnové délce 520 nm až 740 nm, tedy od zelené po červenou oblast viditelného světla. Nevýhodou kapalinových laserů je toxicita a krátká životnost aktivního prostředí, které se rozkládá vlivem tepla a světla. Kapalinové lasery se nahrazují pevnolátkovými lasery [30].

4.6 Vláknové lasery

U tohoto typu laserů dochází ke generování záření v jádru optického vlákna dopovaného prvky ze skupiny lanthanoidů (prvky vzácných zemin). Nejčastěji se používají ionty erbia

nebo ytterbia, popřípadě kombinace obou, občas se používají i ionty praseodymu. Optické vlákno odpovídá svou funkcí krystalu u pevnolátkových laserů. Vláknové lasery pracují v kontinuálním režimu a generují záření o vlnových délkách 1000 nm až 1500 nm. Jako zdroj čerpání vláknových laserů se používají nízko výkonné laserové diody, které mají dobrou kvalitu laserového svazku, vysokou životnost, účinnost a nízkou cenu. Vláknové lasery využívají možnosti paralelního spojení nízko výkonných laserů do jednoho systému. Výkony těchto systémů se mohou pohybovat od stovek wattů až po desítky kilowattů v závislosti na počtu paralelně zapojených nízko výkonných laserů. Firma IPG takto realizovala 100kW kontinuální vláknový laser. Vláknové lasery mají nízkou spotřebu elektrické energie, vysokou účinnost, nízkou hmotnost, vysokou kvalitu laserového svazku a velkou spolehlivost (neobsahují žádné složité pohyblivé součásti a čerpadla jako CO₂ laser, ani nepotřebují vodní chlazení jako Nd – YAG laser, chlazení zde probíhá vzduchem, který chladí vlákno po celé jeho délce). [12], [29], [19].

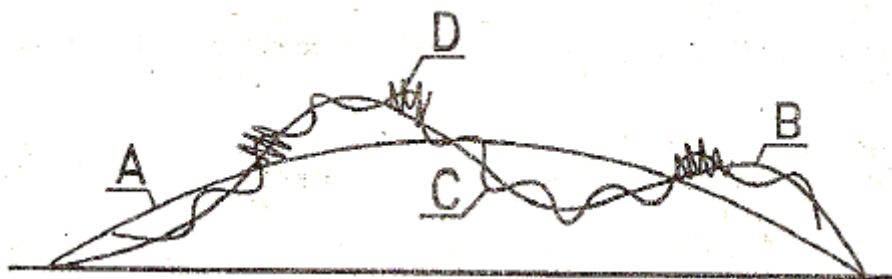
5 Metody hodnocení topografie povrchu

Kontrola jakosti a kvality povrchů je v dnešní době významnou součástí přípravy povrchů ve všech technologiích obrábění. Od vzniku prvních přístrojů pro měření topografie povrchu v roce 1930 byl zaznamenán velký pokrok jak v metodách, tak i v měřicích zařízeních. Výrazným pokrokem bylo uplatnění digitálních metod v 60. letech, které také znamenaly možnost hodnocení povrchu metodou 3D. Neustálé zvyšování nároků na výkon, účinnost, přesnost, spolehlivost, trvanlivost strojů a strojních součástí vyžaduje, aby jakost povrchu byla předepisována na výkresech, podobně jako přesnost rozměrů [2], [18].

5.1 Metrologie kvality povrchu a jeho parametry

Kvalitu povrchu určuje nejen mikrogeometrický tvar a velikost nerovností, které nazýváme souhrnně drsnost povrchu, ale i fyzikální a chemický stav povrchové vrstvy materiálu. Tento stav závisí na způsobu zpracování materiálu od výroby polotovaru až po dokončovací způsoby obrábění. Může být výsledkem různých úprav povrchu, kterými se má dosáhnout některých požadovaných vlastností (např. tvrdosti, odolnosti proti korozi, lesku, barvy, geometrických tolerancí apod.) Podle druhu povrchu rozeznáváme neobrobený a obrobený povrch. Obrobený povrch se vždy liší od ideálního geometrického tvaru. Nulová drsnost, tj. ideální „hladkost“, je na technickém povrchu prakticky nedosažitelná. Všechny technické povrchy mají nějakou drsnost. Drsnost je univerzální charakteristikou všech povrchů a může mít nejrůznější formy [2], [16]. Nerovnosti obrobených ploch znázorňuje obr.5.1. Drsnost povrchu zahrnuje široké spektrum odchylek od geometrického tvaru povrchu, které je možné klasifikovat pomocí popisných charakteristik:

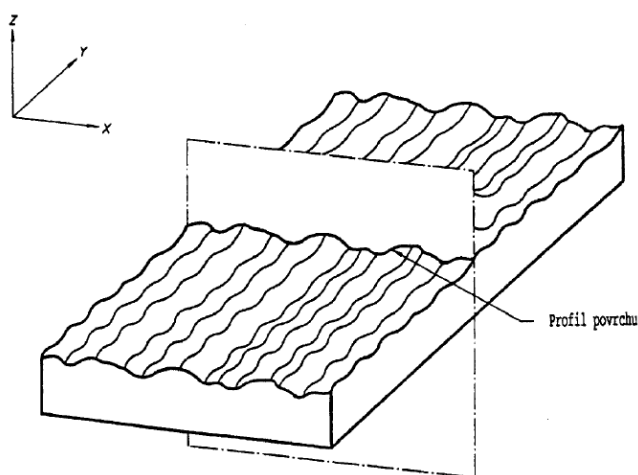
- A) Mimořádné nerovnosti (makronerovnosti) - trhliny, náhodné nerovnosti, nepravidelné rýhy.
- B) Vlnitost povrchu - periodicky opakující se nerovnost. Její tvar je podobný sinusoidě, má poměrně pravidelný rozestup a amplitudu. Vlnitost povrchu vzniká chvěním nástroje a obráběné součásti.
- C) Drsnost povrchu (mikronerovnost) - pravidelně se opakující nerovnost. Je podmíněna technologickým pochodem.
- D) Ultramikronerovnosti – superponují se na opakující se nerovnosti a jsou dány snahou krystalického povrchu dosáhnout nejstabilnějšího stavu.



obr.5.1 Geometrický model povrchu [2]

Obor textury povrchu byl v ISO revidovaný v srpnu 1998 a údaje jsou zpracovány v normě GPS (specifikace geometrického produktu). Filozofie této normy určuje význam vztahu tolerance k funkčnosti povrchu, což se projevuje používáním různých parametrů textury povrchu. Norma ČSN EN ISO 4287 stanovuje termíny, definice a parametry pro určování struktury povrchu (drsnosti a vlnitosti základního profilu) profilovou metodou. Norma ČSN EN ISO 4288 stanovuje pravidla a postupy pro posuzování topografie povrchu. Profilová metoda hodnotí povrch z profilu povrchu, tj. z „čáry“, která vznikne řezem skutečného povrchu definovanou plochou. Tato norma přináší definice různých profilů povrchu, které jsou potřebné při zpracování a vyhodnocení snímaného profilu [2], [3], [4]. Nejdůležitější profily jsou:

- **Skutečný profil** – povrch omezující těleso a oddělující ho od okolního prostředí [3].
- **Profil povrchu** – vznikne jako průsečnice skutečného profilu a dané roviny (obr.5.2) [3].

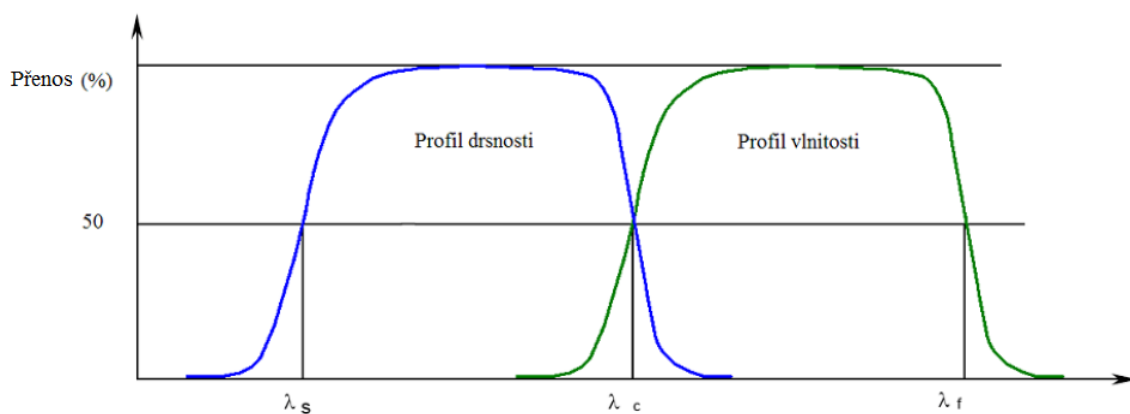


obr.5.2 Profil povrchu [3]

- **Snímaný profil** – odvozuje se z něj všechny ostatní profily definované v uvedené normě. Je definován jako geometrické místo středu hrotu dotyku, který má ideální geometrický tvar (kužel s kulovým zakončením), jmenovité rozměry a při pohybu po povrchu v rovině řezu na něj působí jmenovitá snímací síla [3].

- **Úplný profil** – je to digitální forma snímaného profilu vzhledem k referenčnímu profilu, ve formě vertikálních a horizontálních navzájem si odpovídajících souřadnic. Je charakterizován vertikálním a horizontálním číslíkovým krokem [3].
- **Základní profil** – odvozuje se z úplného profilu po aplikaci filtru s krátkou vlnovou délkou, označovanou λ_s . Reprezentuje základ pro digitální zpracování profilu filtrem profilu a výpočtu parametrů profilu podle ČSN EN ISO 4287. Je charakterizován vertikálním a horizontálním číslíkovým krokem, který může být různý od vertikálního a horizontálního číslíkového kroku použitého při vytváření úplného profilu. Jmenovitý tvar profilu na výkresu součástky, který získáme metodou nejmenších čtverců, není součástí primárního profilu a musí se vyloučit před tím, než se použije filtr. Pro kružnici musí být do optimalizace metodou nejmenších čtverců zahrnut i poloměr, tj. nemá se používat jeho jmenovitá hodnota [3], [12].
- **Profil drsnosti** – odvozuje se ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λ_c . Přenosové pásmo profilu drsnosti je definováno filtry profilu λ_s a λ_c . Tento profil je základem určení parametrů profilu drsnosti [3].
- **Profil vlnitosti** – odvozuje se ze základního profilu použitím profilových filtrů λ_f a λ_c . Postupně se na základní profil aplikuje filtr profilu λ_f a λ_c . Profilový filtr λ_f filtruje dlouhovlnné složky a λ_c filtruje krátkovlnné složky [3].

Přenosové charakteristiky pro profil drsnosti a vlnitosti znázorňuje obr.5.3.



obr.5.3 Přenosové charakteristiky pro profil drsnosti a vlnitosti [3]

Z profilu povrchu se odvozují jednotlivé profily, u kterých jsou definovány parametry:

- **Základní parametr (P – parametr)** – parametr vypočítaný ze základního profilu [3].
- **Parametr drsnosti (R – parametr)** – parametr vypočítaný z profilu drsnosti [3].
- **Parametr vlnitosti (W – parametr)** – parametr vypočítaný z profilu vlnitosti [3].

Mezi nejvýznamnější definice výškových parametrů profilu povrchu patří:

- ***Ra*** – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu. Je to aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $y(x)$ v rozsahu základní délky l [3]. *Ra* lze vyhodnotit podle (5.1)

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (5.1)$$

kde l je základní délka profilu [mm], $y(x_i)$ jsou výšky nad nebo pod střední čarou profilu [mm].

- ***Rq*** – průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu. Je to kvadratický průměr pořadnic $y(x)$ v rozsahu základní délky l [3]. *Rq* je možné vyhodnotit podle (5.2)

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |y^2(x)| dx} \quad (5.2)$$

kde l je základní délka profilu [mm], $y(x_i)$ jsou výšky nad nebo pod střední čarou profilu [mm].

- ***Rz*** – největší výška profilu. Je to součet výšky Zp a hloubky Zv . Zp je nejvyšší výstupek profilu a Zv je nejnižší prohlubeň profilu v rozsahu základní délky l [3].
- ***Rsk*** – šikmost posuzovaného profilu (skewness). Je to podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $y(x)$ a třetí mocniny hodnoty *Rq* v rozsahu základní délky [3]. *Rsk* lze vyhodnotit podle (5.3)

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \left[\frac{1}{l} \int_0^l |y^3(x)| dx \right] \quad (5.3)$$

kde l je základní délka profilu [mm], $y(x_i)$ jsou výšky nad nebo pod střední čarou profilu [mm].

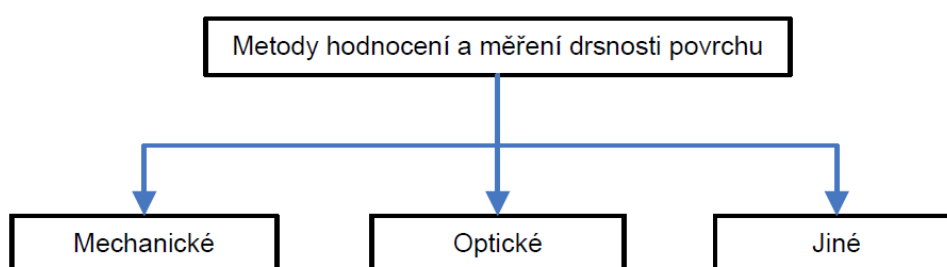
- ***Rku*** – špičatost posuzovaného profilu (kurtosis). Je to podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $y(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty *Rq* v rozsahu základní délky [3]. *Rku* lze vyhodnotit podle (5.4)

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \cdot \left[\frac{1}{l} \int_0^l |y^4(x)| dx \right] \quad (5.4)$$

kde l je základní délka profilu [mm], $y(x_i)$ jsou výšky nad nebo pod střední čarou profilu [mm].

5.2 Metody hodnocení a měření topografie povrchu

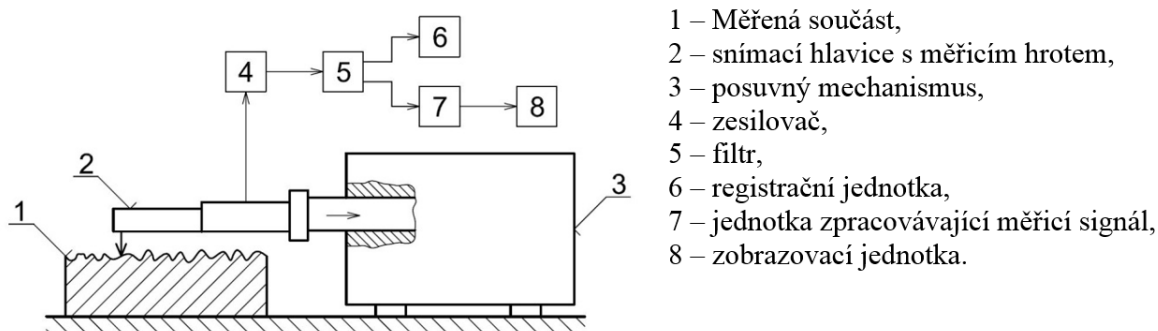
Metody hodnocení a měření topografie povrchu lze rozdělit na kvantitativní a kvalitativní. Kvantitativní metody hodnocení nám poskytnou číselnou hodnotu některé veličiny topografie povrchu např. R_a , R_q , R_z . Tyto hodnoty se měří speciálními přístroji, např. dotykovým profilometrem (dotykové metody) nebo optickými měřicími přístroji (bezdotykové metody) a jejich schéma je znázorněno na obr.5.4. Kvalitativní metody hodnotí veličiny topografie povrchu porovnáváním se vzorky, u kterých jsou tyto veličiny známy. Porovnávací vzorky mají tvar destiček nebo válečků a jejich drsnosti jsou stanoveny některou z kvantitativních metod [2].



obr.5.4 Rozdělení metod hodnocení a měření drsnosti povrchu

5.2.1 Mechanické metody

Mechanická neboli dotyková metoda je doposud nejpoužívanější metoda ve strojírenské praxi. Její výhodou je přímé měření a možnost použití pro všechny typy povrchů. Analogový záznam topografie povrchu, který je výsledkem této metody, lze převádět do digitální formy. V odborné literatuře se naměřené hodnoty touto metodou používají jako vztažné a srovnávací hodnoty pro jiné metody měření. Nicméně v důsledku tlaku na hrot snímače dochází k elastické a plastické deformaci v povrchové vrstvě. Intenzita deformace povrchu hrotem závisí na tvrdosti povrchu. Ve většině případů dochází k tomu, že hrot snímače poškodí měřený povrch, což je nevhodné nejen pro hodnocený povrch, ale i pro výsledek měření [2], [16]. Na obr.5.5 je uvedeno schéma kontaktního profilometru.



obr.5.5 Schéma kontaktního profilometru [32]

Výhody mechanických metod měření topografie povrchu jsou:

- Přímé měření výškových nerovností povrchu vůči referenční rovině.
- Vysoká rozlišovací schopnost a velký měřicí rozsah ve směru kolmém na střední rovinu povrchu.
- Možnost měření v zaprášeném prostředí.

Nevýhody mechanických metod měření topografie povrchu jsou:

- U měkkých materiálů může dojít k destrukci povrchu.
- Relativně pomalý pohyb hrotu po měřeném povrchu.
- Neumožňuje kontinuální kontrolu a řízení kvality povrchu.
- Pouze 2D měření.

5.2.2 Optické metody

Optické metody měření jsou jistou náhradou za měření kontaktními profilometry. Jde o bezdotykové měření. Povrch zůstává neporušený. Dotykový hrot je nahrazen světelným paprskem, který se od měřeného povrchu odráží nebo rozptyluje. Vzájemné působení světla a povrchu je závislé na vlnové délce, drsnosti povrchu a vlastnostech měřeného povrchu. Jestliže jde o nepřímé měření, je potřeba experimentální data porovnat s daty získanými mechanickými metodami. [2], [12].

Výhody optických metod měření topografie povrchu jsou:

- Možnost kontinuální kontroly a řízení kvality povrchu.
- Opakovatelnost, reprodukovatelnost měření.
- Bezkontaktnost a nedestruktivnost měřeného povrchu.
- Možnost měření z větší vzdálenosti.

Nevýhody optických metod měření topografie povrchu jsou:

- Měření parametrů drsnosti povrchu je nepřímé.
- Složitější interpretace výsledků
- Zatížená korelace na normované parametry

5.2.3 Jiné metody

Existuje celá řada metod měření parametrů topografie povrchu, které pracují na jiném principu než mechanické nebo optické metody. Patří sem například mikroskopy SEM, STM, AFM, pomocí kterých lze zjistit topografie povrchu, lokální magnetismus, elektrická vodivost, tepelná vodivost, odrazivost a absorpce světla, a další parametry [2].

Metoda SEM (Scanning Electron Microscopy) je založena na analýze vysokoenergetického proudu elektronů, které dopadají na povrch, kde ztrácejí energii a vyvolávají odezvu v podobě několika druhů měřitelných signálů [1].

Metoda STM a AFM (Scanning Tunelling Microscopy and Atomic Force Microscopy) stanovují difference ve vlastnostech tunelového efektu (STM) a v charakteru meziatomárních sil (AFM) vlivem nerovnosti povrchu.

5.3 Metody měření pro řešení experimentální části

V experimentální části byla měřena topografie povrchu 22 vzorků kontaktní metodou. Jako měřicí přístroj byl použit SurfTest SJ – 400 od firmy Mitutoyo (obr.5.6) a měření proběhlo v laboratoři Diagnostiky povrchů materiálů Institutu fyziky HGF VŠB – TUO.



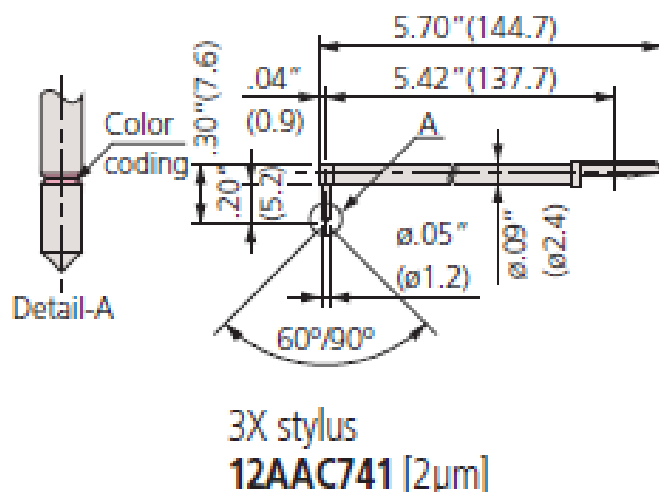
obr.5.6 Surftest SJ – 400 [27]

Tento kontaktní profilometr slouží pro měření parametrů drsnosti povrchu dotykovou metodou. Surftest SJ – 400 dokáže vyhodnocovat 38 parametrů drsnosti v různých normách (JIS, DIN, ISO a ANSI). Výstupní naměřené hodnoty je možno zobrazovat na displeji, který je součástí tohoto zařízení. Je tu možnost naměřená data rovnou tisknout v tiskárně, která je připojená na Surftest SJ – 400. Pro experimentální část však byl použit výstup na PC, kde je možnost naměřená data analyzovat v počítači a převádět do různých formátů. Pro účely experimentu byly data převedeny do podoby excel souborů. Základní technické parametry Surftestu SJ – 400 jsou uvedeny v tab.5.1.

tab.5.1 Technické parametry kontaktního profilometru Surftest SJ – 400 [27]

Parametry	Hodnota
Maximální měřicí rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	1
Maximální výškový rozsah měřicího hrotu [μm]	2400
Standardní přitlačná síla snímače [mN]	4
Rozlišení snímače [μm]	0,000125
Měřicí základní délky [mm]	0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8

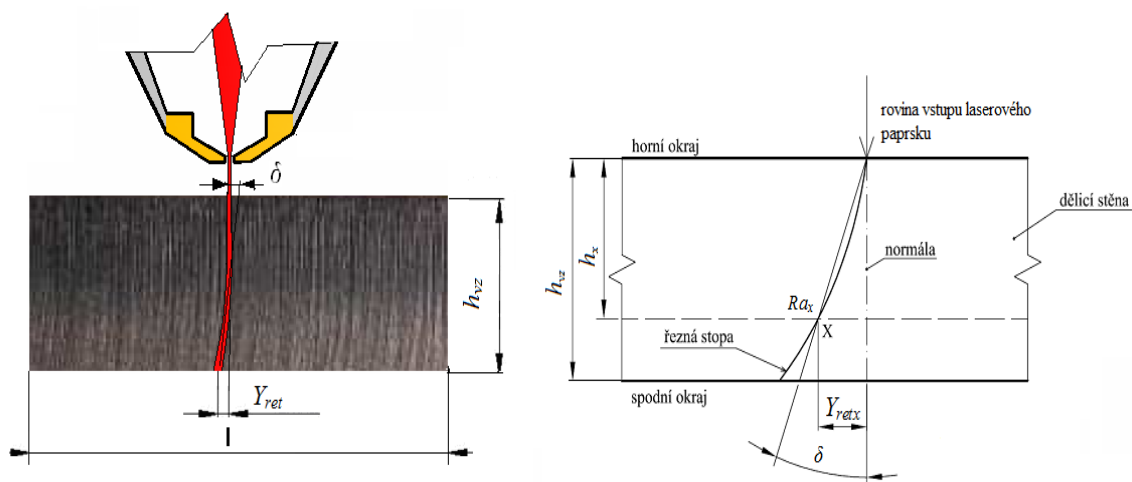
Pro měření byl použit diamantový dotykový hrot. Konkrétní hodnoty parametrů povrchu lze stanovit na základě posuvného pohybu, který koná hrot po měřeném povrchu. V experimentální části práce byl pro měření parametrů povrchu použit hrot pro měření drsnosti povrchu, který znázorňuje obr.5.7.



obr.5.7 Schéma dotykového hrotu [27]

5.4 Hlavní geometrické parametry topografie řezných stěn

Geometrické ukazatele nás informují o změnách tvaru a rozměrech trvale deformovaného tělesa. K nejdůležitějším geometrickým ukazatelům patří trvalé deformace měřitelné na povrchu řezných stěn. Trvalé deformace hodnotí proces kvalitativně (změna fyzikálně – mechanických vlastností) i kvantitativně (změna vnějších rozměrů). Při zkoumání geometrie řezu vycházíme z kontinuálního tělesa, které se skládá z navzájem svázaných v prostoru rozložených bodů. Vzniklá deformace kontinuálního tělesa se považuje za nepřetržitou vzájemnou změnu poloh jednotlivých bodů. Geometrické ukazatele (prvky trvalé deformace) rozdělujeme na lineární a úhlové. Lineární vyjadřují změnu lineárních rozměrů celého tělesa nebo jeho určitých částí (zrna, vlákna). Úhlové vyjadřují změny měřených úhlů v celém tělese nebo jen v jeho určitých částech. K posouzení celkové deformace kontinuálního tělesa je v našem řešení zkoumána geometrie stěny řezu po laserovém dělení. Za hlavní parametry geometrie stěny řezu jsou navrženy následující parametry: drsnost povrchu Ra , retardace dělicí řezné stopy Y_{ret} , úhel zakřivení dělicí stopy δ (deviace) a hloubka dělicího řezu h , resp. tloušťka děleného vzorku (obr.5.8).



obr.5.8 Geometrické parametry řezné hrany u CO₂ laserového řezání a způsob měření parametrů Ra_x , Y_{retx} , δ_x , h_x v bodě X ve stopě řezu [8]

Na základě matematicky popsanych geometrických parametrů a vztahů mezi nimi je možné sledovat a teoreticky predikovat průběh deformace a tvorby topografie povrchu materiálu děleného laserem. A na tomto základě také zpětnou vazbou analyticky a sofistikovaně navrhovat základní technologické parametry laseru podle materiálů a řídit tak proces dělení, resp. obrábění jak po stránce finální kvality, tak po stránce ekonomiky provozu.

6 Experimentální část

Experimentální část této diplomové práce obsahuje popis výroby vzorků technologií laserového řezání a hodnocení topografie povrchu (drsnosti). Na uskutečnění experimentu bylo použito laserové řezací zařízení od firmy Trumpf, a to TruLaser 3030 s laserem TruFlow 4000. Jde o plynový CO₂ laser s vlnovou délkou 10,6 μm. Konstantní výkon vztažený na výkon laseru je $\pm 2 \%$. Na měření vzorků a následné vyhodnocení topografie povrchu byl použit kontaktní profilometr SurfTest SJ – 400.

6.1 Experimentální řezání

Na výrobu vzorků bylo použito laserové zařízení TruLaser 3030 (obr.6.1) s laserem TruFlow 4000. Vzorky byly vypáleny ve firmě ROMOTOP spol. s r.o., která disponuje těmito technologiemi. TruLaser 3030 spojuje univerzálnost a vysoký výkon. Tento laser je schopen řezat konstrukční ocel o tloušťce 20 mm, ušlechtilou ocel o tloušťce 15 mm a hliník o tloušťce 10 mm. Důvodem schopnosti laseru řezat rozdílné tloušťky je různá tepelná vodivost a různé mechanické parametry těchto materiálů. Pro minimalizování vedlejších časů je tento laser vybaven univerzální laserovou hlavou. Jeho technické parametry jsou v tab.6.1.

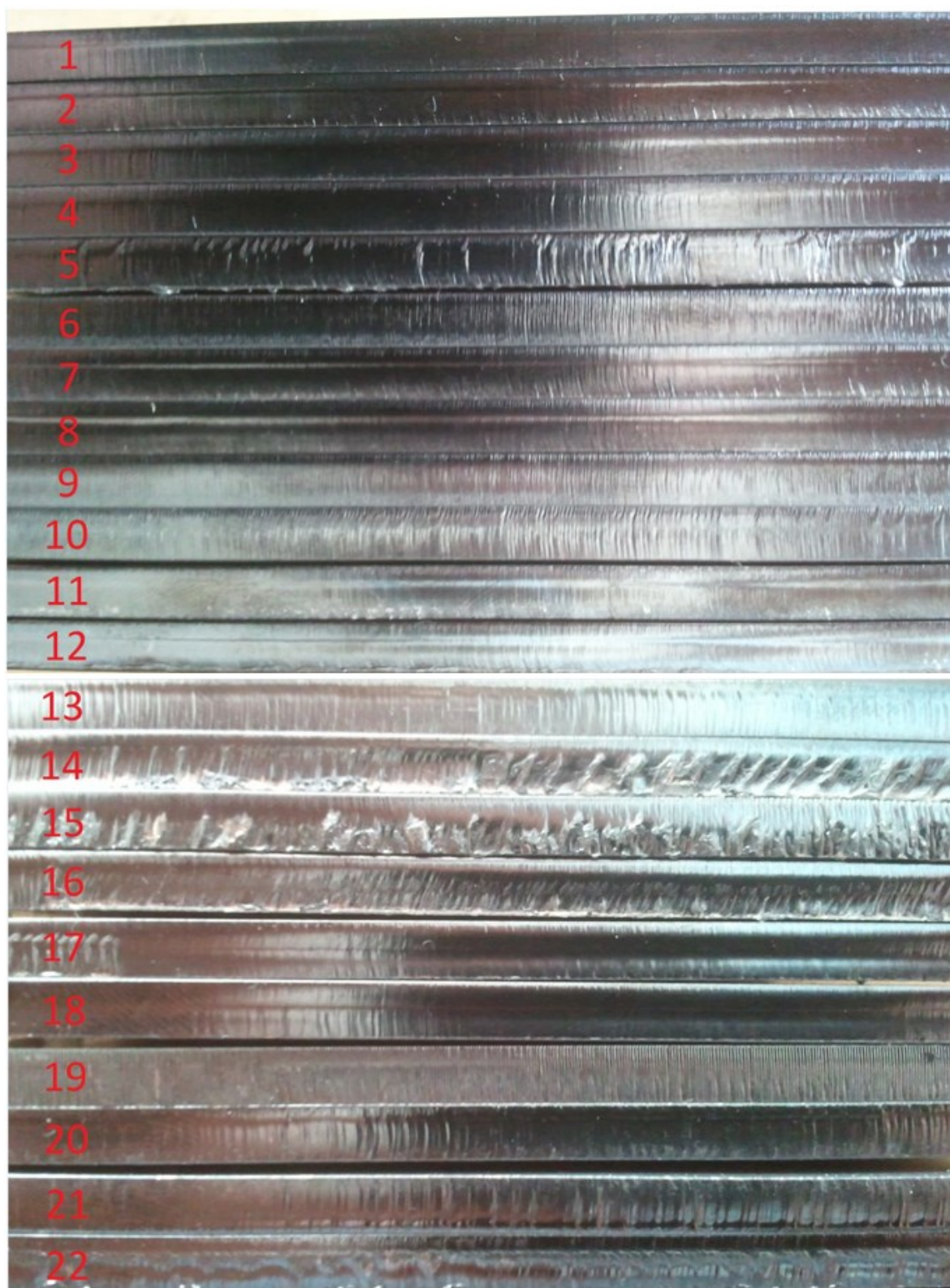


obr.6.1 TruLaser 3030 od firmy Trumpf [33]

tab.6.1 Technické parametry laseru TruLaseru 3030 a TruFlow 4000 [33]

Rozměry stroje	
Délka	6300 mm
Šířka	7200 mm
Výška	2200 mm
Maximální rychlost	
Simultánně	140 m/min
Pracovní rozsah	
Osa x	3000 mm
Osa y	1500 mm
Specifická data laseru TruFlow 4000	
Maximální výkon laseru	4000 W
maximální tloušťka plechu z konstrukční oceli	20 mm
maximální tloušťka plechu z ušlechtilé oceli	15 mm
maximální tloušťka plechu z hliníku	10 mm
Hodnoty spotřeby	
Průměrný příkon ve výrobě laseru TruFlow 4000	31 kW

Bylo vyrobeno 22 vzorků (obr.6.2). Zkušební vzorky byly vypáleny z plechové tabule o rozměrech 5 x 1500 x 3000 mm z oceli S235JRH (ČSN 11375). Konečné rozměry vzorků byly 5 x 60 x 100 mm. Technologické parametry, které měly při řezání vzorků konstantní hodnotu jsou v tab.6.2. Technologické parametry, které se pro výrobu jednotlivých vzorků měnily, jako výkon laseru, řezná rychlost laseru, nastavení ohniskové vzdálenosti (fokusace) a šířka řezné drážky, jsou v tab.6.3.



obr.6.2 Experimentální vzorky

tab.6.2 Konstantní technologické parametry

Technologické parametry	Hodnota
Druh asistenčního plynu	O ₂ , koncentrace 99,95%
Tlak asistenčního plynu [bar]	0,8
Vzdálenost trysky asistenčního plynu [mm]	1,0
Průměr trysky asistenčního plynu [mm]	1,0
Úhel nastavení řezací hlavy [°]	87,3
Velikost čočky ["]	7
Režim laseru	CW - Kontinuální

tab.6.3 Technologické parametry při výrobě jednotlivých vzorků

Číslo vzorku	Rychlost řezání [mm/min]	Výkon [W]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná spára [mm]
1	3400	3600	-1,2	0,25
2	4000	3600	-1,2	0,25
3	4000	4000	-1,2	0,25
4	4000	4000	-0,4	0,25
5	4000	4000	-2	0,25
6	4000	4000	-1,2	0,2
7	4000	3200	-1,2	0,25
8	4000	3200	-0,4	0,25
9	2500	3600	-1,2	0,25
10	2500	4000	-1,2	0,3
11	2500	4000	-1,2	0,2
12	2500	4000	-2	0,2
13	2500	4000	-1,2	0,25
14	2500	4000	-2	0,25
15	2500	3200	-1,2	0,25
16	2500	3200	-0,4	0,25
17	3400	3600	-0,4	0,2
18	3400	3600	-1,2	0,2
19	3400	3600	-1,2	0,3
20	3400	4000	-2	0,25
21	3400	4000	-1,2	0,3
22	3400	4000	-0,4	0,3

6.1.1 Charakteristika materiálu oceli S235JRH (ČSN 11375)

Jedná se o neušlechtilou nízkouhlíkovou ocel obvyklé jakosti, dobře svařitelnou. Tato ocel se používá na výrobu běžných konstrukčních součástí. Chemické složení je uvedeno

v tab.6.4, mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab.6.5 a základní fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v tab.6.6.

tab.6.4 Chemické složení oceli S235JRH

C [%]	P [%]	S [%]	N [%]
max. 0,17	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,009

tab.6.5 Mechanické vlastnosti oceli S235JRH

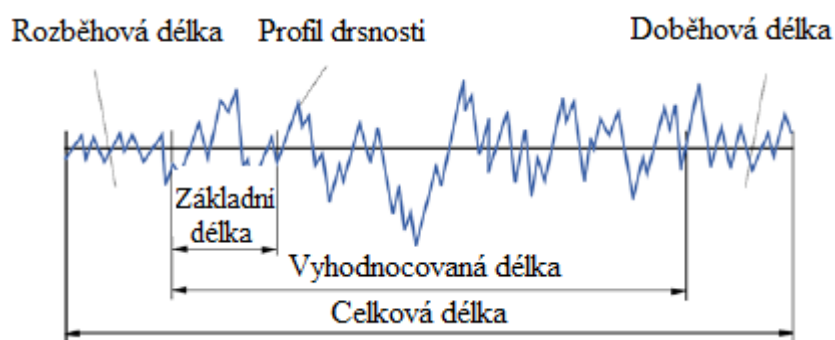
Re [MPa]	Rm [MPa]	Tvrdost [HB]	Tažnost A10 [%]	Kontrakce [%]
196 až 235	363 až 441	161 až 223	23	45 až 50

tab.6.6 Základní fyzikální vlastnosti oceli S235JRH

Hustota ρ [kg·m ⁻³]	teplotní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹]	tepelná vodivost λ_I [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
7850	11,1·10 ⁻⁶	54,5

6.2 Experimentální měření

Na měření drsnosti povrchu vzorků byl použit kontaktní profilometr Surftest SJ – 400 a Surftest SJ – 401. Vzorky se měřily od horní hrany ke spodní. Začátek měření vzorku byl 0,5 mm od horní hrany a po intervalu 0,4 mm bylo naměřeno 10 hodnot na každém vzorku. Parametry měření a podmínky vyhodnocení znázorňuje obr.6.3 a tab.6.7.

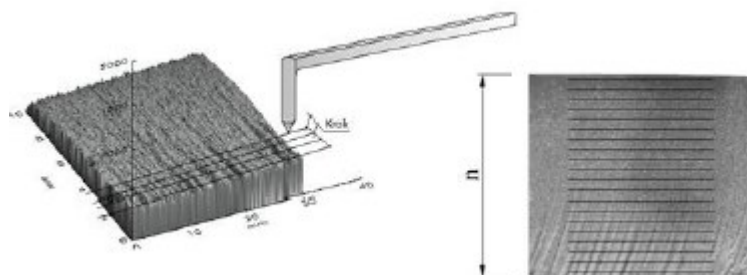


obr.6.3 parametry měření Surftest SJ – 400, Surftest SJ – 401 a Talysurf

tab.6.7 Podmínky vyhodnocení měření

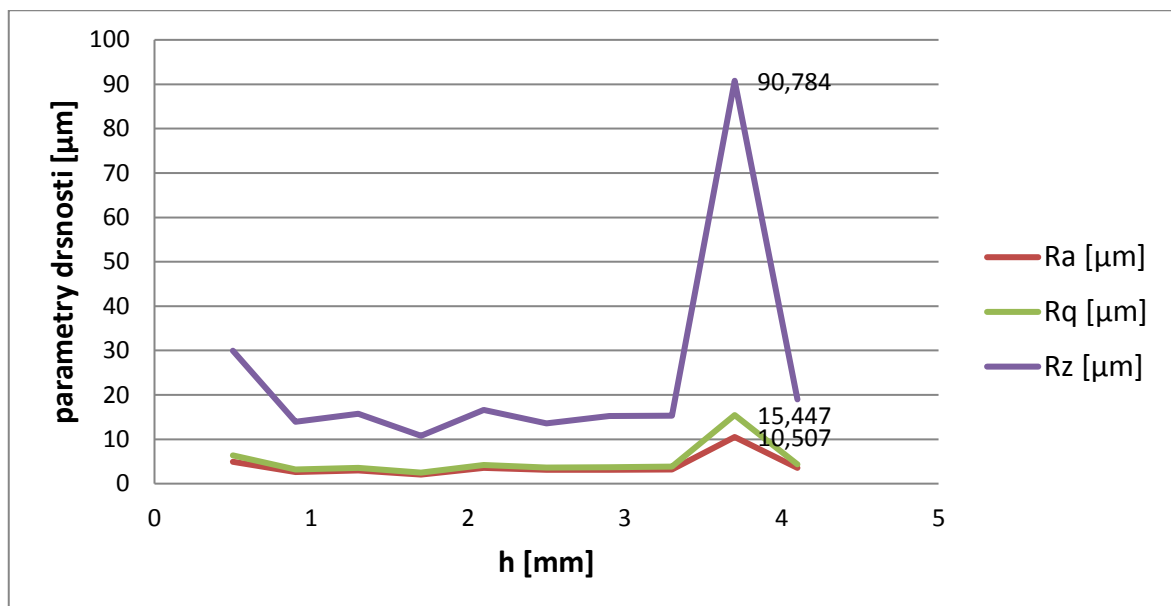
Druh profilu	R ISO
Základní délka [mm]	0,8
Počet základních délek	5
Lc [mm]	0,8
Ls [mm]	0,0025
Druh filtru	Gauss
Vyhodnocovací délka [mm]	4,0
Přejezd [mm]	0,4
Nájezd [mm]	0,4
Délka měření [mm]	4,8
Rychlost měření [mm·s ⁻¹]	1,0

Jak se měřilo a krokovalo po 0,4 mm zobrazuje schématické znázornění měření na obr.6.4. Tento princip měření je stejný pro všechny vzorky.

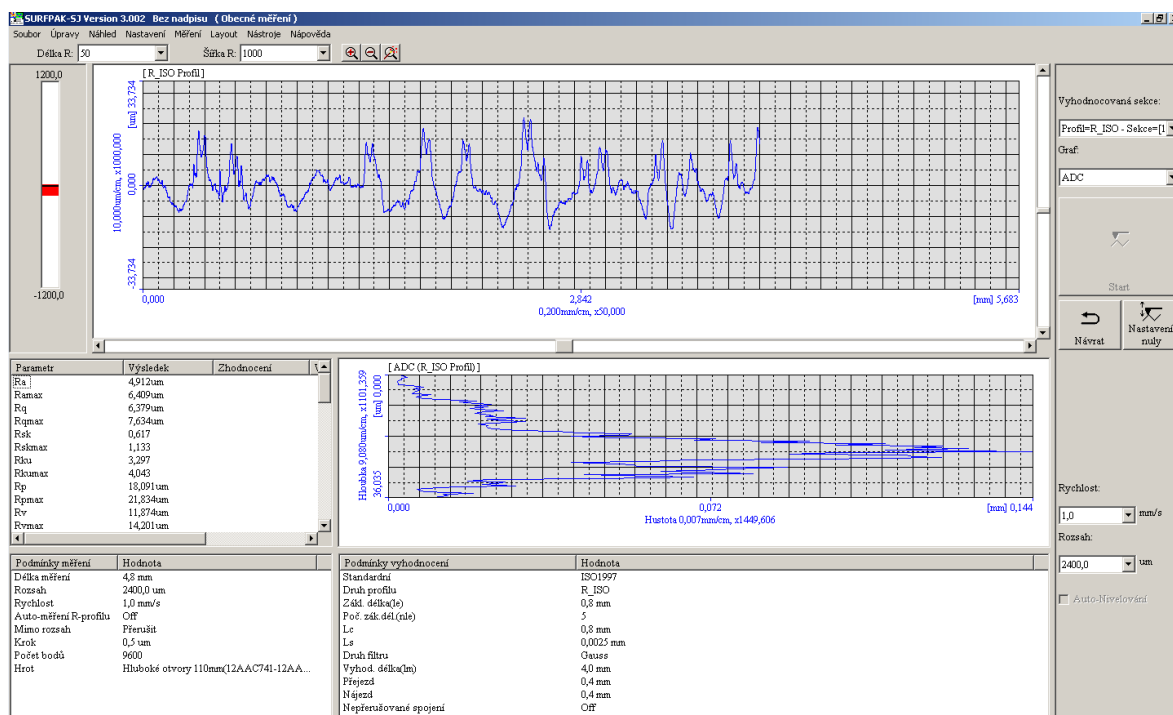


obr.6.4 Princip měření kontaktním profilometrem [12]

V mé bakalářské práci byly vyhodnoceny naměřené hodnoty parametrů drsnosti Ra , Rz , Rq a z těchto hodnot byly vytvořeny grafy v závislosti na rostoucí hloubce h . Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 1 znázorňuje obr.6.5 a záznam měření kontaktním profilometrem SurfTest SJ – 400 je na obr.6.6.



obr.6.5 Průběh hodnot parametrů R_a , R_q , R_z v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 1



obr.6.6 Záznam měření topografie povrchu pomocí kontaktního profilometru SurfTest SJ – 400

6.3 Experimenty na laserovém systému PLATINO 2040 / CP3500 a ZAPHIRO / CV5000

Tato experimentální část popisuje realizaci výroby zkušebních vzorků a hodnocením kvality topografie řezných stěn. Pro realizaci experimentů byly použity řezací stroje

nejmodernější konstrukce od společnosti Prima Industry. Obrobené povrchy byly následně proměřeny na kontaktním profilometru Mitutoyo Surftest SJ 401 a opticko - kontaktním profilometru Talysurf CLI 2000.

6.3.1 Použitá zařízení pro realizaci experimentální části

Příprava vzorků technologií CO₂ laserového řezání byla uskutečněna ve firmě Metakov s.r.o. Vzorky byly připraveny na přístroji PLATINO 2040 / CP3500 a ZAPHIRO / CV5000 od firmy Prima Industry.

6.3.2 CNC 2D/3D laser Prima Industry Zaphiro CV 5000

Zaphiro je nejnovější 2D laserové řezací zařízení s možností 3D řezání profilů a trubek (obr.6.7). Provedení laseru zajišťuje vysokou dynamiku pohybu s nejvyšší kvalitou řezu. Lineární motory a pevná konstrukce, funkce maximální kombinace rychlosti 240 m·min⁻¹ výrazně snižují výrobní časy a náklady. Vynikající vlastnosti stroje zajišťuje kontrolní Perfect Cut System. Jde o inteligentní systém, který umožňuje v reálném čase detekci kvality řezu a automatické korekce systémových parametrů v případě, že se kvalita liší od požadovaného standardu. Pro off-line programování se využívá jednoduše ovladatelný systém MAESTRO - Libellula. Umožňuje řezat všechny materiály a tloušťky se špičkovými výkony a výsledky. Technická specifikace stroje je uvedena v tab.6.8 [37].



obr.6.7 CNC 2D / 3D laser Prima Industrie, typ Zaphiro / CV5000 [37]

tab.6.8 Specifikace laseru Zaphiro / CV5000 [37].

Pracovní prostor	
X [mm]	3050
Y [mm]	1600
Z [mm]	150
Maximální rychlost [mm.min ⁻¹]	240
Přesnost polohování [mm]	0,030
Rozměry a váhové parametry	
délka [mm]	9700
šířka [mm]	3600
výška [mm]	2600
hmotnost [kg]	10000
Výkon [W]	5000

6.3.3 CNC 2D laser Prima Industrie PLATINO 2040 / CP3500

CNC 2D laser Prima Industrie, typ PLATINO 2040 / CP3500 je univerzální laser nejmodernější konstrukce s velkým pracovním výkonem (obr.6.8). Představuje jednu z nejpresnějších laserových technologií s krokem odměřování 0,001 mm. Technická specifikace stroje je uvedena v tab.6.9 [37].



obr.6.8 Platino 2040 / CP 3500 [37]

Otevřená a přístupná konstrukce stroje umožňuje snadnou integraci s automatickým manipulačním systémem (automatická a rychlá výměna palet). PLATINO je programovaný softwarem PICAM - 2D CAD - CAM, (princip off - line), který umožňuje rychlou a snadnou tvorbu vstupního řezacího programu.

tab.6.9 Specifikace laseru PLATINO 2040 / CP 350 [37]

Pracovní prostor	
X [mm]	4000
Y [mm]	2000
Z [mm]	150
Maximální rychlost [mm.min ⁻¹]	80
Přesnost polohování [mm]	0,030
Rozměry a váhové parametry	
délka [mm]	12300
šířka [mm]	4000
výška [mm]	2500
hmotnost [kg]	11500
Výkon [W]	3500

6.4 Experimentální příprava zkušebních vzorků

Experimentální část za účelem porovnání kvality řezných stěn u technologie CO₂ laserového řezání byla provedena na konstrukční oceli, titanové, nerezavějící chromniklové a hliníkové slitině. Tyto materiály tvoří nejčastější aplikace pro operace 2D dělení materiálů ve strojírenství. Přehled testovaných materiálů je uveden v tab.6.10.

tab.6.10 Přehled testovaných materiálů

Materiál	Obchodní značení	Norma	Tloušťka	Rozměry vzorků (b x h x l) [mm]
Konstrukční ocel	S235JRG2	EN 10025	10 mm	50 x 10 x 60
Nelegovaná jakostní konstrukční ocel	S335JO	ČSN EN 10025	10 mm	50 x 10 x 60
Titan slitina	Titan grade 2	ASTM B265-99	11 mm	50 x 11 x 60
Chromniklová slitina	304	AISI 304	12 mm	50 x 12 x 60
Hliníková slitina	AlMg ₃	EN AW AlMg ₃	8 mm	50 x 8 x 60

Celkem byla realizována výroba 100 vzorků. Jednotná metodika pro sestavení plánovaného experimentu v tomto případě nebyla možná, neboť proces dělení materiálů vykazuje pro každou testovanou skupinu materiálu rozdílné chování při utváření textury řezné stěny vzhledem k technologickým parametrům řezu. Sestavení technologických režimů experimentu bylo provedeno dle doporučení technologů a podmínek doporučení

výrobce řezacího systému Prima Industry. Následně byl studován vývoj utváření textury při změně hlavních technologických parametrů podle tab.6.11.

tab.6.11 Experimentální podmínky CO₂ laserového řezání

Technologické podmínky	S235JRG2	ASTM B265-99	AISI 304	AlMg₃	S355J0
Tloušťka materiálu [mm]	10, 15, 20	10	10, 15, 20	8, 12, 15	10, 15, 20
Průměr trysky d_d [mm]	2 - 3	3	0,8 - 2	3	2 - 3
Tloušťka čočky ["]	7,5-9	9	9	7,5-9	7,5 -9
Laserový mód	CW kontinuální	CW kontinuální	CW kontinuální	CW kontinuální	CW kontinuální
Přídavný plyn	O ₂	N ₂	N ₂	N ₂	O ₂
Vzdálenost z [mm]	0,5 - 1	0,8 - 1	0,5 - 1,2	0,5 - 1	0,5 - 1
Tlak [bar]	0,5 - 2	10, 14, 15	12, 16, 19	10, 13, 15	0,5 - 2
Fokuse ohniska f [mm]	1	-1, -4, -8	-5, -7, -8	-4, -6, -8	-4, -6, -8
Posuvová rychlost [mm.min ⁻¹]	1000, 750, 500	600, 500, 350	850, 600, 350	1200, 1000, 800	1000, 750, 500
Výkon [W]	2500, 3500, 4500	3500, 4500, 5000	1500, 3000, 5000	3500, 4500, 5000	3500, 4500, 5000

6.5 Způsob vyhodnocení získaných dat

Vzorky vytvořené CO₂ laserovým řezáním byly změřeny pomocí přístroje Talysurf CLI 2001 a pro kontrolu dat na kontaktním profilometru Mitutoyo Surtest SJ401, popsáno výše (kapitola 5). Vyhodnocení měřené drsnosti povrchu (Talysurf CLI2000) bylo provedeno programem Talymap.

6.5.1 Vyhodnocení dat programem Talymap

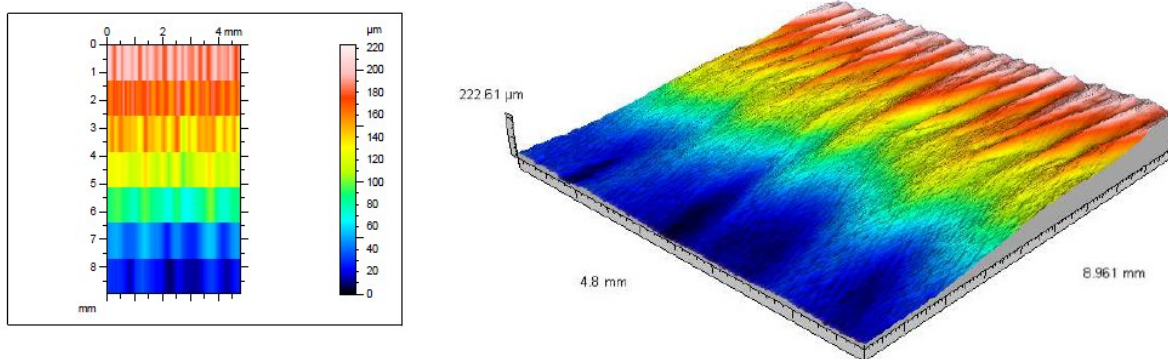
V programu Talymap Platinum byl po načtení odpovídajícího souboru dat měření

aplikován následující postup vyhodnocení:

1. Leveling – vyrovnaní profilu drsnosti podle zvolené oblasti,
2. Zommed – výběr délky drsnosti pro hodnocení (4,8 mm),
3. Thresholding – zahrnuje do analýz odpovídající spektrum dat,
4. Form removal - odstranění tvarových úchylek,
5. Filtrace mezi vlnitostí a drsností - Cut Off 0,8 mm – dle norem,
6. Grafické zobrazení profilu – pro všechny prvky profilu – 2D nefiltrováno, 2D vlnitost, 2D drsnost,

7. Určení parametrů drsnosti – pro všechny prvky profilu – 2D nefiltrováno, 2D vlnitost, 2D drsnost.

Tato metodika vyhodnocení dat byla aplikována na všechna provedená měření. Příklad zobrazení textury povrchu je znázorněn na obr.6.9.



obr.6.9 Příklad zobrazení textury povrchu - vzorek S235JRG2

6.5.2 Vyhodnocení dat programem SURPAK SJ

Měřicí systém Surtest SJ 401 je doplněn o program statistické analýzy drsnosti povrchu SURFPAK-SJ, který nabízí funkce pro datovou analýzu a vytvoření protokolů. Základní parametry pro oba typy měření metodiky jsou uvedeny na obr.6.3 a princip měření dotykovým profilometrem je na obr.6.4.

6.5.3 Vliv zdvihu a fokusace

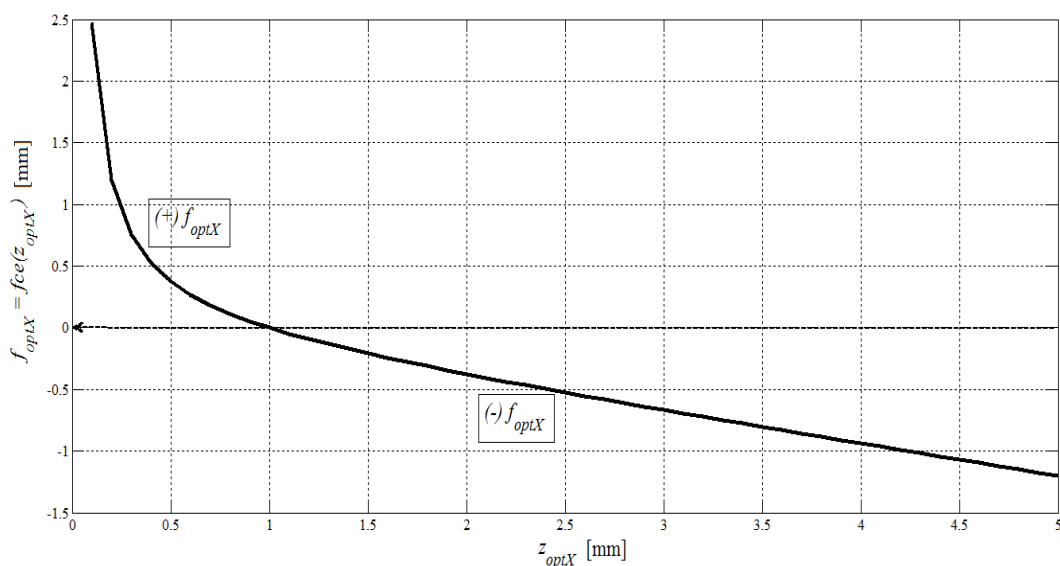
Fyzikální vlastnosti laserového paprsku jsou popisovány v kapitole 2.2. Z technologického hlediska jde o postihnutí vlivu parametrů fokusace (+/-) f a zdvihu z na vlastní dělicí proces. Pro kontrolu volby těchto parametrů lze použít upravené rovnice (2.2) a (2.3) na tvary (6.1) a (6.2). Nevýhodou pro praxi je obdržení pouze kladné hodnoty pro fokusaci (+) f . Tyto rovnice jsou odvozeny z geometrie paprsku a nerespektují mechanické vlastnosti děleného materiálu a hloubku dělicího řezu.

$$f = 10^6 \cdot D_f \cdot (3.14 \cdot \rho \cdot K) \quad (6.1)$$

$$z = 0.1 \cdot 0.64 \cdot \frac{\lambda}{3.14} \cdot \frac{f^2}{\rho^2} \quad (6.2)$$

Vhodnost volby záporné hodnoty fokusace $(-)f$ se ozřejmí pro aktuální materiál úpravou rovnic na empirický tvar (6.3). Obdržíme tak průběhovou závislost $(+/-)f = fce(z)$ podle grafu na obr.6.10. Z grafu plyne zásada nepřímé závislosti mezi oběma parametry. Zvětšujeme-li zdvih z je nutno úměrně zmenšovat fokusační vzdálenost, případně volit v praxi často užívanou zápornou hodnotu $(-)f$.

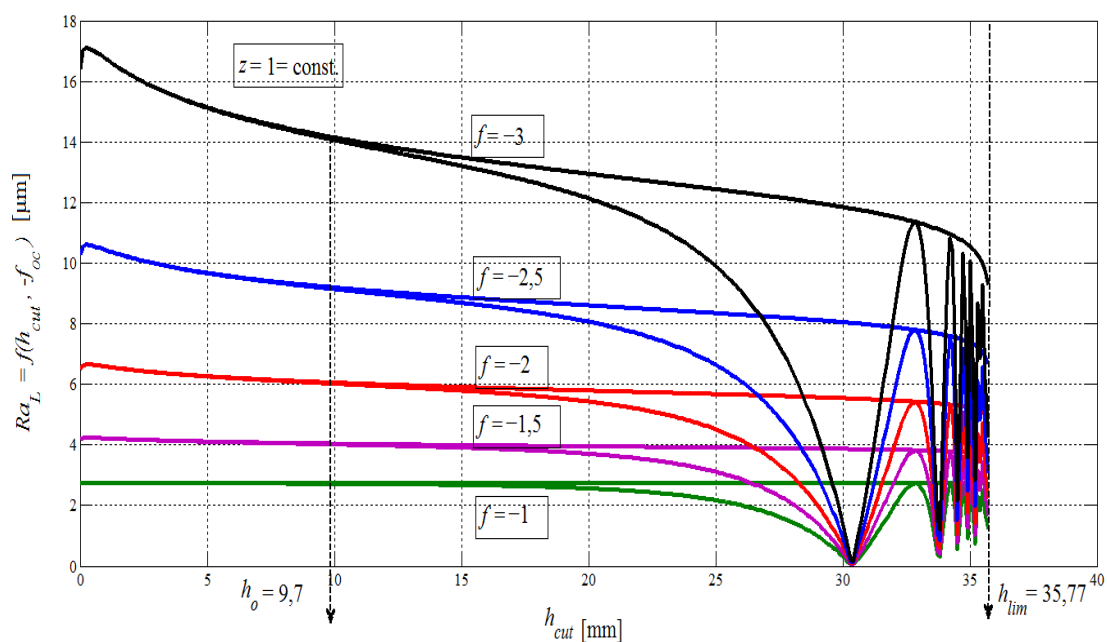
$$f = 0.25 \cdot (z^{-2})^{0.5} \cdot (1 - z^2) \quad (6.3)$$



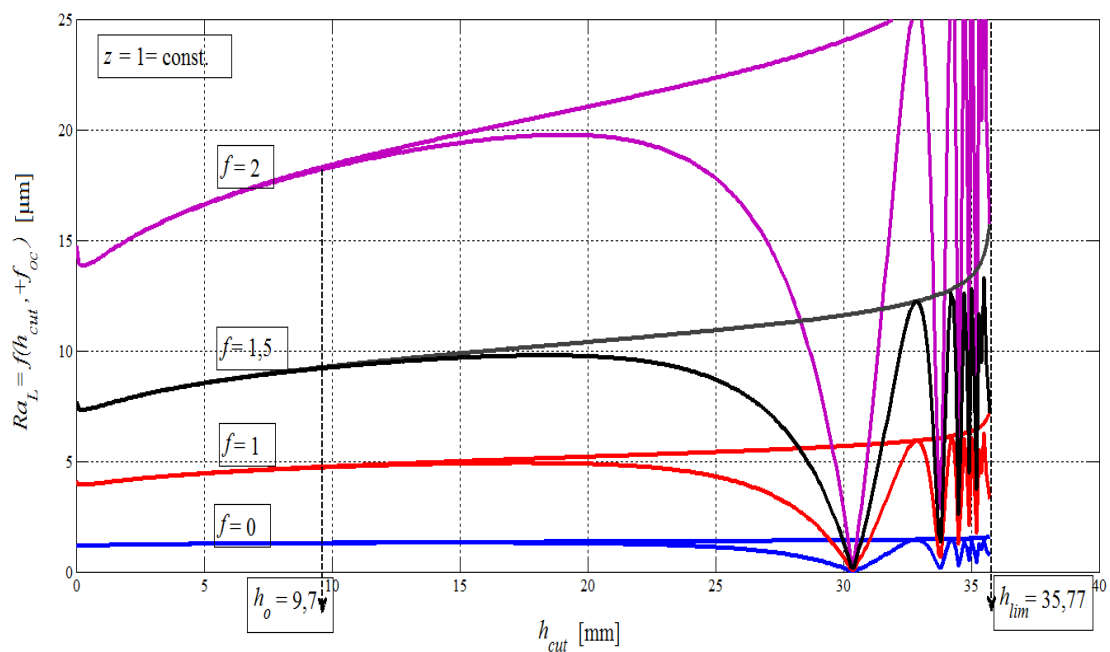
obr.6.10 Průběh závislosti $(+/-)f = fce(z)$ pro ocel AISI 304

Významný vliv na tvary finálních topografických funkcí prezentují níže uváděné grafy na obr.6.11 s dosazovanými kladnými hodnotami fokusace. Grafy na obr.6.12 ukazují případy s dosazovanými zápornými hodnotami fokusace při $z = 1 \text{ mm} = \text{konst.}$ pro oba případy. V zásadě platí konvexní tvar finálního profilu řezných stěn v případě kladných hodnot fokusace a naopak konkávní tvar finálního profilu v případě záporných hodnot fokusace. V případě různého kombinování parametrů zdvihu a fokusace mohou být finální profily řezných stěn různé. Profily stěn jsou vypočteny podle výše odvozených rovnic pro ocel AISI 304 s použitím analytickou cestou optimalizovaných technologických parametrů.

Topografické profily podle fokusace (+/-) f (při $z = 1 \text{ mm} = \text{konst.}$)



obr.6.11 Konkávní tvary finálního profilu v případě volby záporných hodnot fokusace ($-$) f pro ocel AISI 304



obr.6.12 Konvexní tvary finálního profilu v případě volby kladných hodnot fokusace (+) f pro ocel AISI 304

6.5.4 Termodynamické procesy v řezech

Pro kontrolu postupu řešení podle termodynamických veličin bylo s výhodou využito práce [23]. Odtud byla sestavena tab.6.12 vzájemného vztahu vybraných parametrů pro čisté prvky a analogicky tab.6.13 pro litinu, oceli a další materiály. Vykreslíme-li hodnoty v tabulkách, potvrdí se vzájemné vztahy obr.6.13 až obr.6.18.

Materiálová konstanta dělitelnosti K_{cutL} vychází z přímého měření vybraných geometrických prvků v libovolném bodě X na povrchu řezné stěny podle schématu na obr.6.3. K_{cutL} je parametrem materiálovým a komplexním. Vyhovuje rovnici ve tvaru (6.4) s fyzikální jednotkou [μm] a má velkým význam pro další analýzy procesu.

$$K_{cutL} = \frac{Ra \cdot h}{Y_{ret}}, [\mu\text{m}] \quad (6.4)$$

Parametr K_{cutL} dále umožňuje přímo návaznost na pružně – pevnostní vlastnosti dělených materiálů a na zákony klasické pružnosti – pevnosti. Jelikož s dostatečně ověřenou těsností také platí vztah k modulu pružnosti v tahu E_{mat} ve tvarech:

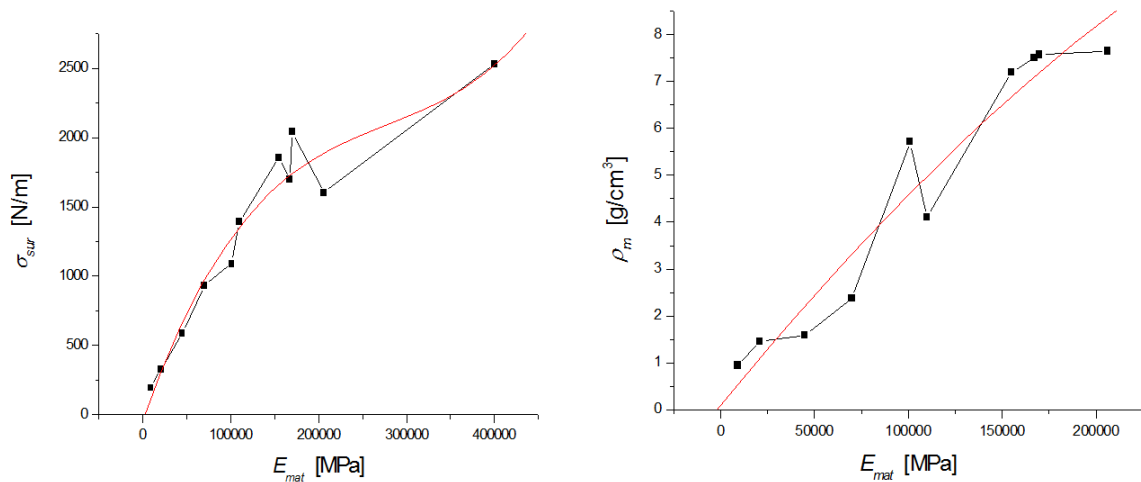
$$K_{cutL} = \frac{10^{12}}{E_{mat}^2}, [\mu\text{m}] \quad (6.5)$$

$$E_{mat} = \sqrt{\frac{10^{12}}{K_{cutL}}}, [\text{MPa}] \quad (6.6)$$

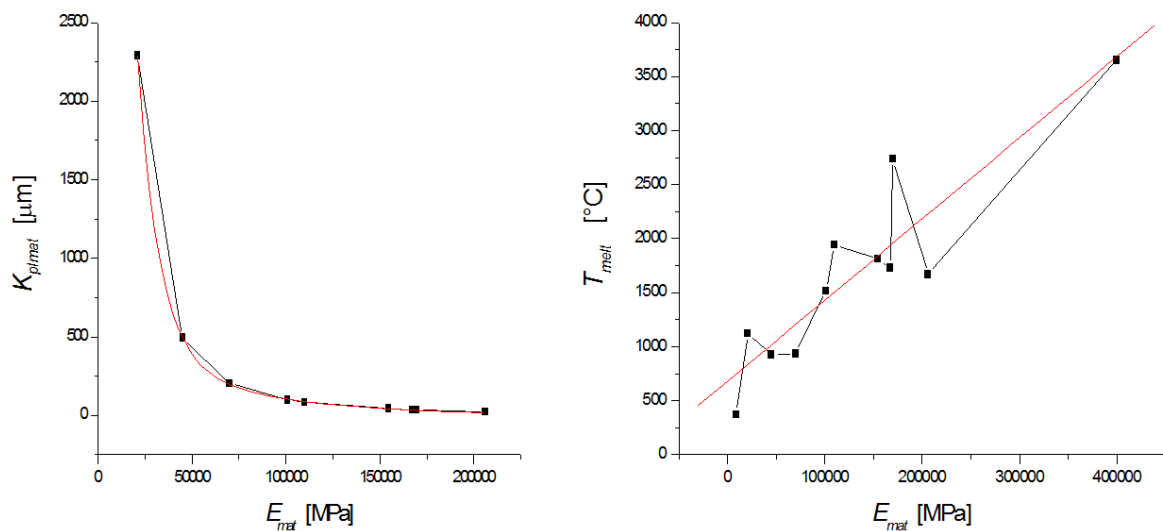
Například pro titan je $K_{cutL} = 82,64 \mu\text{m}$, $E_{mat} = 110\,000 \text{ MPa}$ pro ocel AISI 304 je $K_{cutL} = 35,7707 \mu\text{m}$ a pro plastičtější hliník $K_{cutL} = 204,08 \mu\text{m}$.

tab.6.12 Numerické hodnoty pro prvky [23]

Struktura	Materiál	E_{mat}	σ_{suro}	ρ_m	T_{melt}	K_{cutL}	h_0	$h_{Xtp(gr)}$
bcc	Na	9100	194	0,947	371	12075,8	3263,73	97,3
bcc	Ca	20899	328	1,45	1122	2289,32	618,74	66,5
hcp	Mg	45000	588	1,59	924	493,83	133,47	37,5
fcc	Al	70000	930	2,37	934	204	55,14	23
fcc	Mn	101038	1090	5,72	1517	97,96	26,48	28
bcc	Ti	110000	1390	4,1	1941	82,6	22,32	31,5
bcc	Fe	154767	1856	7,2	1811	41,75	11,28	11
bcc	Nb	169832	2040	7,57	2740	34,67	9,37	24,16
bcc	W	400000	2530	8,72	3653	6,25	1,69	1,42



obr.6.13 Kontrola funkčních závislostí $\rho_{sur} = fce(E_{mat})$ a $\rho_m = fce(E_{mat})$



obr.6.14 Kontrola korelačních závislostí $K_{plmat} = fce(E_{mat})$ a $T_{melt} = fce(E_{mat})$ pro prvky podle Tab.6.12

Regresní vztahy:

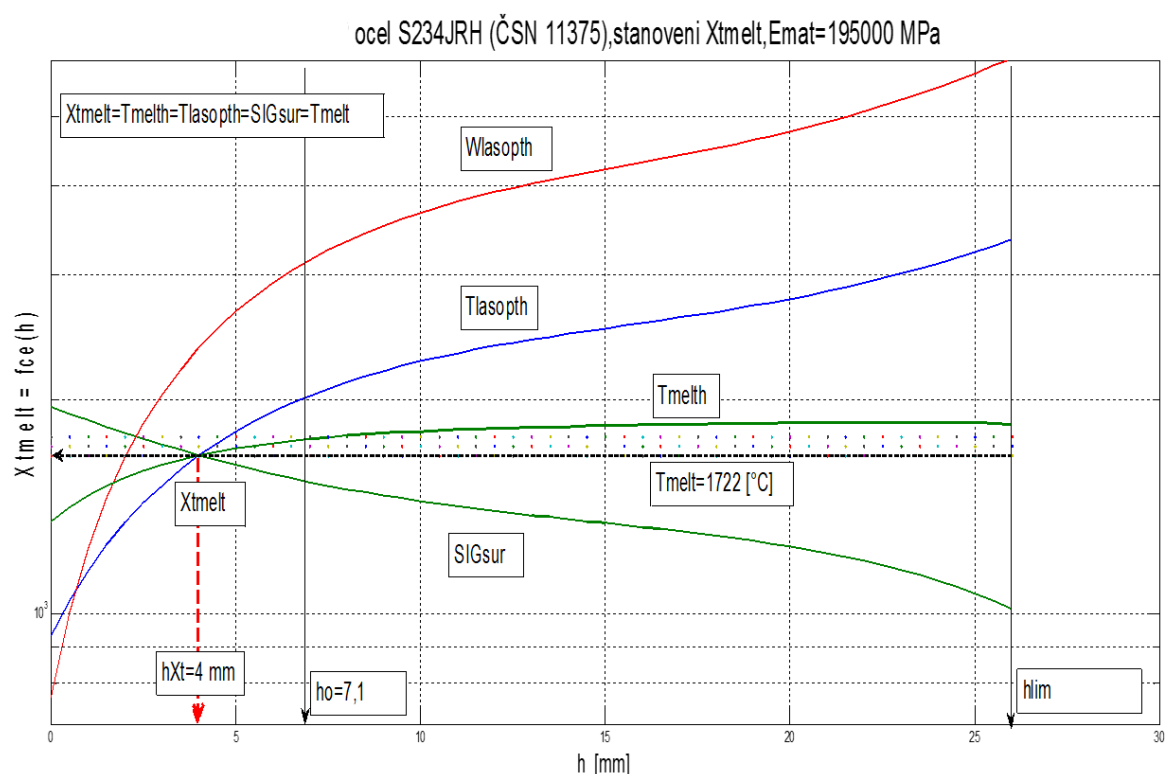
$$T_{melt} = \frac{(E_{matT} - 46365.35941)}{95.5896}, [^{\circ}\text{C}] \quad (6.7)$$

$$E_{matT} = 46365.35941 + 95.5896 \cdot T_{melt}, [\text{MPa}] \quad (6.8)$$

tab.6.13 Numerické hodnoty pro technické materiály [23]

Materiál	σ_{sur0}	ρ_m	E_{mat}	T_{melt}	K_{cut}	h_0	$h_{Xtp(gr)}$
ocel 0.3%	1500	7,83	206000	1500	24	6,37	2,7
bílá litina 3.1%	1500	6,62	150000	1450	44	12,01	1,85
šedá litina 3.9%	1150	6,27	140000	1400	51	13,79	5,72
měď slitina	1103	8,39	123000	1356	66	17,86	68
hliník slitina	300	2,37	69700	934	206	55,63	11
cín slitina	526	6,91	47400	505	445	120,29	23,2

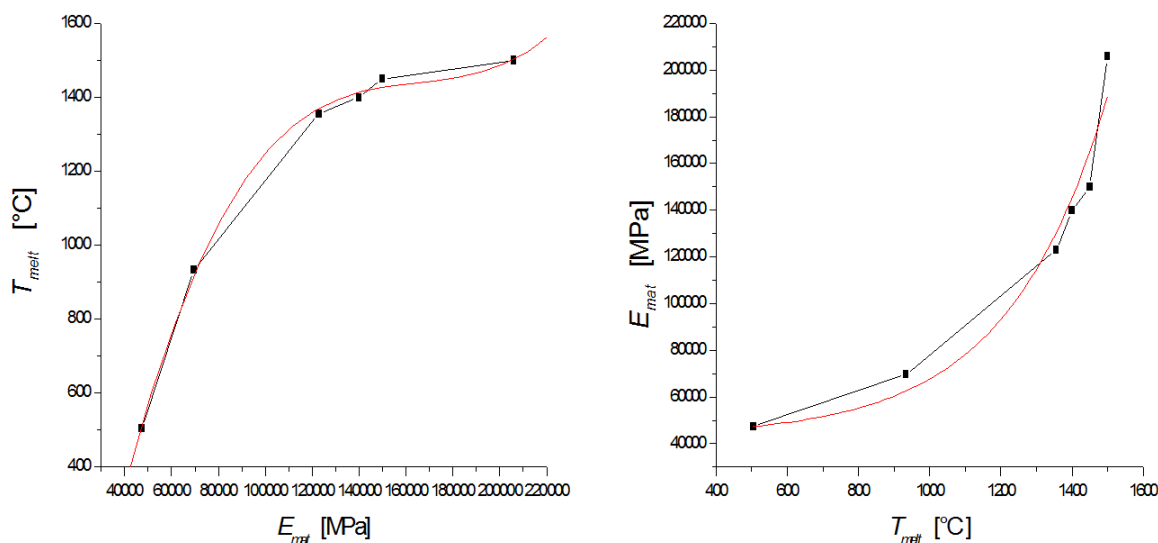
V tabulkách jsou uvedeny hodnoty parametrů, kde σ_{sur0} je povrchové napětí na hloubkové úrovni h_0 [$N \cdot m^{-1}$], ρ_m je měrná hmotnost [$g \cdot cm^{-3}$], E_{mat} je Youngův modul [MPa], T_{melt} je tavný bod [$^{\circ}C$], K_{cutL} je materiálová konstanta dělitelnosti [μm], h_0 je hloubková úroveň neutrální roviny [mm], $h_{Xtp(gr)}$ je hloubková poloha tzv. trojného termodynamického bodu $X_{tp}(gr)$ z grafu [mm]. V definici X_{tp} jde o průsečík tří průběhových funkcí podle h a hodnoty tavení materiálu a tedy $X_{tp} = T_{melth} = T_{lasoph} = \sigma_{sur0} = T_{melt}$, jak ukazuje graf na obr.6.15.



obr.6.15 Stanovení X_{tmelt} pro ocel S235JRH (ČSN 11375)

Kde X_{tmelt} je trojný termodynamický bod, T_{melth} je teplota stěn v řezu podle h [$^{\circ}C$], T_{lasoph} je teplota objemová optimalizovaná v řezu podle h [$^{\circ}C$], σ_{sur} je povrchové napětí z teploty stěn v řezu podle h [$^{\circ}C$], T_{melt} je tavná teplota materiálu [$^{\circ}C$], h_{Xt} je hloubka trojného termodynamického bodu v řezu [mm], h_0 je hloubka neutrální roviny v řezu [mm], h_{vz} je

tloušťka děleného materiálu [mm], h_{lim} je maximální (limitní) tloušťka děleného materiálu pro daný laser [mm].

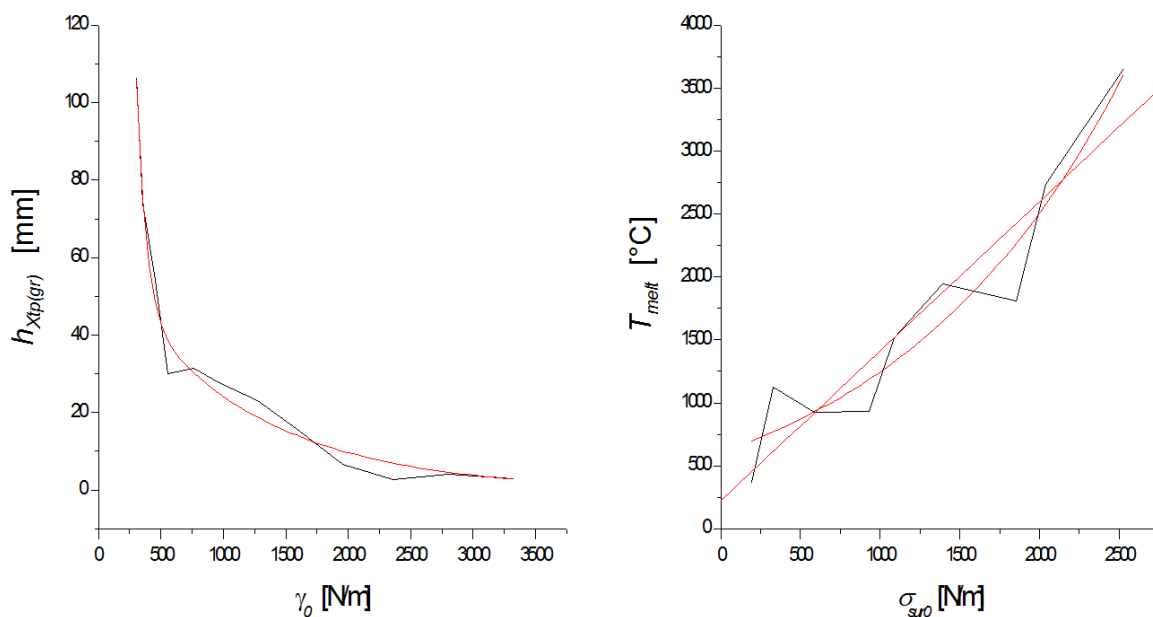


obr.6.16 Kontrola závislosti $T_{melt} = fce(E_{mat})$, resp. inverzně $E_{mat} = fce(T_{melt})$ pro technické materiály podle Tab.6.13

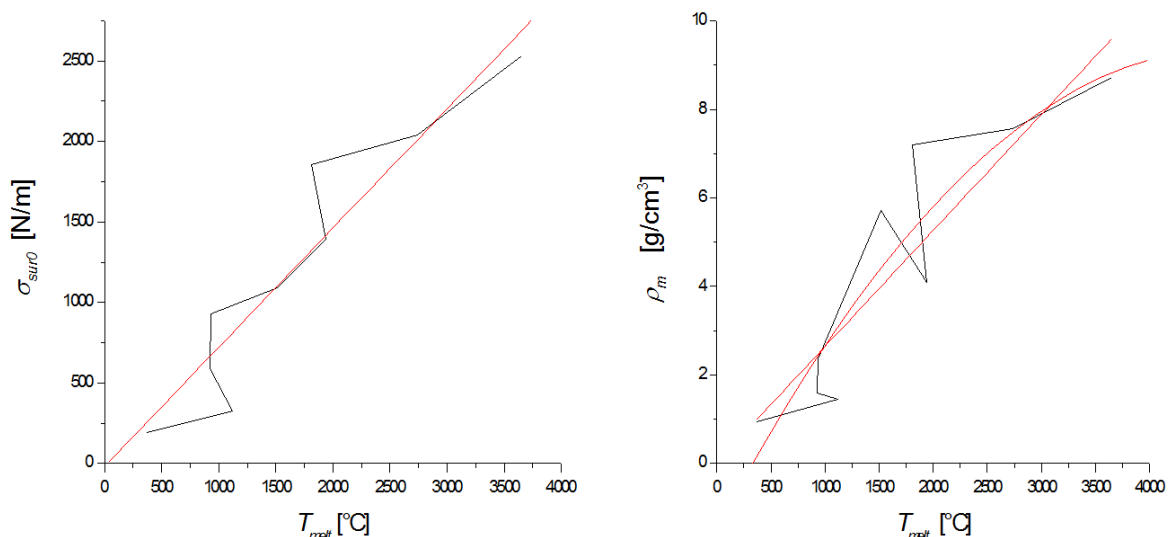
Regresní vztahy :

$$T_{melt} = -999,4116 + 0,04276 \cdot E_{mat} - 2,5375 \cdot 10^{-7} \cdot E_{mat}^2 + 5,1041810^{-13} \cdot E_{mat}^3 \quad (6.9)$$

$$E_{mat} = 43199,36705 + 689,54187 \cdot e^{\left(\frac{-T_{melt}}{-280,21207}\right)} + 735,59709 \cdot e^{\left(\frac{-T_{melt}}{-1,51409 \cdot 10^{26}}\right)} - 681,80385 \cdot e^{\left(\frac{-T_{melt}}{1,98746 \cdot 10^{64}}\right)} \quad (6.10)$$



obr.6.17 Kontrola korelačních závislostí $h_{Xtp} = fce(\sigma_{sur0})$ a $T_{melt} = fce(\sigma_{sur0})$



obr.6.18 Kontrola korelačních závislostí $\sigma_{suro} = fce(T_{melt})$ a $\rho_m = fce(T_{melt})$

Regresní vztahy :

$$h_{Xtp} = 2679,22429 \cdot e^{\left(\frac{-\sigma_{suro}}{79,10293}\right)} + 60,5769 \cdot e^{\left(\frac{-\sigma_{suro}}{1085,91821}\right)} \quad (6.11)$$

$$T_{melt} = 371 + 670,64632 \cdot e^{\left(\frac{-\sigma_{suro}}{-1486,08033}\right)} - 438,53868 \cdot e^{\left(\frac{-\sigma_{suro}}{1,88575 \cdot 10^{147}}\right)} \quad (6.12)$$

$$T_{melt} = 224,50642 + 1,18696 \cdot \sigma_{suro} \quad (6.13)$$

$$\sigma_{suro} = -20,22452 + 0,74123 \cdot T_{melt} \quad (6.14)$$

$$\rho_m = 0,947 + 4107,50533 \cdot e^{\left(\frac{-T_{melt}}{-1,56887 \cdot 10^6}\right)} - 4108,42896 \cdot e^{\left(\frac{-T_{melt}}{-1,66803E87}\right)} \quad (6.15)$$

Z celkového souboru těchto vztahů jsou mimo jiné v dalším postupu využity zejména korelační závislosti a regresní rovnice funkcí $(E_{mat}, \sigma_{suro}) = fce(T_{melt})$. A to proto, že upozorňují na nutnost k těmto vztahům při navrhování technologických režimů přihlížet. V některých případech z nich při dimenzování technologie vycházet. Lze tímto způsobem identifikovat hloubkovou polohu trojného termodynamického bodu $h_{Xtp} = fce(T_{melt}, \sigma_{sur}, T_{melth}, T_{lasoph})$. Stanovení X_{tp} a h_{Xtp} pro ocel S235JRH (ČSN 11375) je zde prezentováno v grafu na obr.6.15.

Zjištění existence termodynamického bodu X_{tp} ve stopě řezu a identifikace jeho hloubkové polohy h_{Xtp} je považována jako velmi důležitá. Z technologického hlediska a z hlediska mechanismu dezintegrace materiálu laserem bude velmi pravděpodobně vymezovat

maximálně dosažitelnou hloubku dělicích řezů. Důvodem k determinaci hloubky je v tomto případě objemové roztavení materiálu ve stopě řezu.

6.6 Stanovení základních technologických parametrů a distribuce drsnosti povrchu

Pro širší prezentaci a možnost porovnání výstupů byla vybrána skupina šesti kovových materiálů s rozdílnými fyzikálně – mechanickými vlastnostmi. Vybrané materiály a k nim optimalizované technologické parametry laseru uvádí Tab.6.14. Postup pro stanovení optimálních technologických parametrů laseru a kvality řezu pro různé materiály popisuje tato kapitola.

Pro komplexní výpočet, projektování a předpověď kvality finální drsnosti povrchu, vzniklého řezáním laserem, byl zpracován algoritmus pro výpočet v programu Matlab. Výpočet je interaktivní a je možno ho měnit a upravovat, například technologem, za účelem dosažení optimální kvality i ekonomiky provozu.

Prvním krokem je zadání materiálu. Může jít o definování materiálu podle Youngova modulu pružnosti v tahu E_{mat} [MPa], nebo teploty tavení T_{melt} [°C], nebo také podle hloubky řezu h [mm]. Místo často chybějícího parametru modulu pružnosti v tahu E_{mat} lze v praxi použít materiálovou konstantu dělitelnosti K_{cutL} [μm]. Parametr K_{cutL} vychází z přímého měření vybraných geometrických prvků v libovolném bodě X na povrchu řezné stěny podle schémat na obr.6.3. Lze ho vyjádřit rovnicí (6.4). Parametr K_{cutL} je v rovnicích také definován jako koeficient nebo konstanta plasticity $K_{plmat} = K_{cutL}$ [μm]. Pro zjištění modulu pružnosti v tahu E_{mat} v praxi lze použít rovnic (6.4), (6.5) a (6.6). Vychází se tak z naměřených hodnot Ra , h a Y_{ret} na zkušebním vzorku materiálu podle schématu výše na obr.5.8.

Pro ocel S235JRH (ČSN 11375) je $K_{cutL} = 26,3$ μm. Pro další analyzované materiály uvádí tuto hodnotu Tab.6.12 a Tab.6.13. Tato konstanta plasticity $K_{plmat} = K_{cutL}$ může být použita jako materiálová konstanta na zadávacím vstupu do algoritmu. Dále může být využita jako orientační hodnota pro stanovení maximální hloubky řezu h_{lim} v různých materiálech optimalizovanou technologií. V tom případě pro libovolný materiál platí ověřený vztah $h_{lim} = K_{plmat}/Ra_o$

K nejdůležitějším vytypovaným proměnným pro odvození topografické funkce $Ra=fce(h)$ lze využít napět'ově – deformačních parametrů děleného materiálu v součinnosti s řešením mechanické rovnováhy soustavy. Rovnováhou soustavy jsou na mysli vlastnosti materiálu, vlastnosti nástroje a vlastnosti deformace. Topografickou funkci Ra_d lze vyjádřit implicitně vztahem (6.16).

$$Ra_d = f(h, Re, W_{las}, IND_{vpw}, Y_{ret}, \delta, v_p, p, d, f, z \dots) \quad (6.16)$$

Kde h je hloubka řezu [mm], Re je mez kluzu [MPa], W_{las} je výkon laseru [W], IND_{vpw} je index optimálního poměru posuvové rychlosti k výkonu laseru, Y_{ret} je odchylka stopy řezu [mm], δ je úhel zakřivení stopy řezu [°], v_p je posuvová rychlost [mm.min⁻¹], p je tlak asistenčního plynu [bar], d je průměr trysky [mm]. Pojem vlastnosti nástroje lze nahradit pojmem vlastnosti technologie.

Druhým krokem je návrh optimalizovaných parametrů technologického režimu. Jednou z možností je optimalizovat technologické parametry podle modulu pružnosti v tahu E_{mat} .

Návrh optimalizovaných parametrů technologického režimu podle E_{mat}

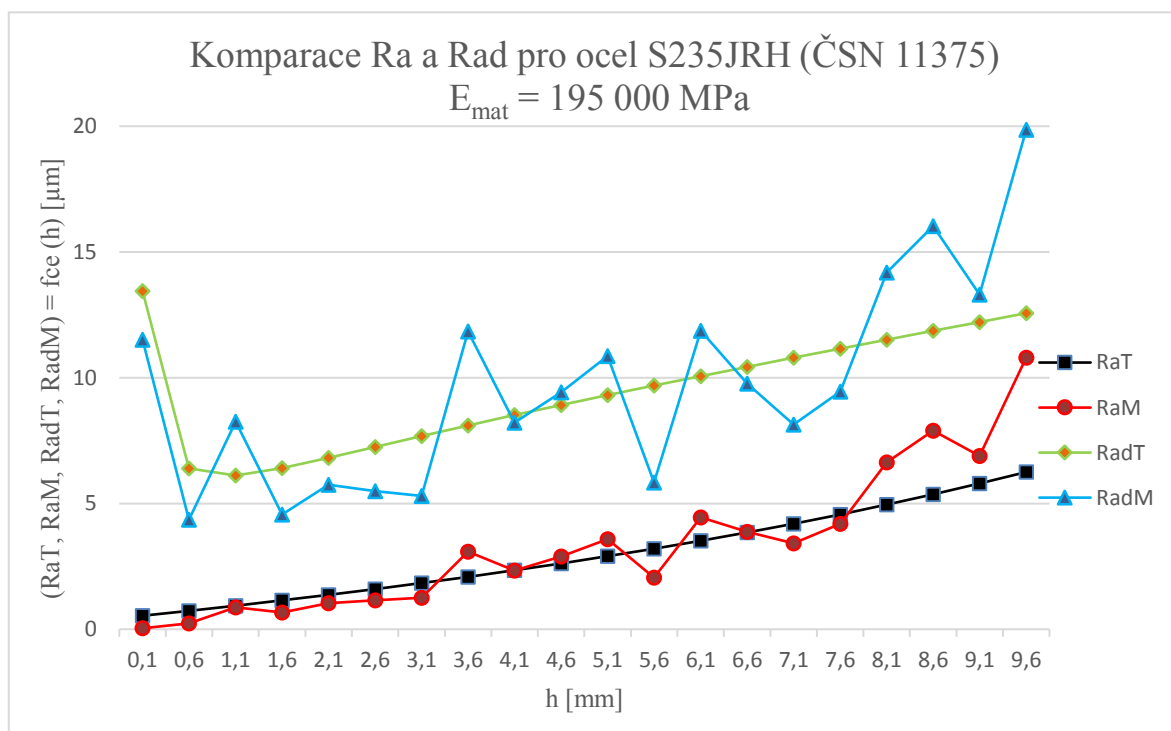
Emat=Emat,
Kcut=10 ¹² /Emat ² ,
Tcut= log(Emat),
WlasE=522.90495+0.0113*Emat,
VlasE=1156.94043+6401.37612*exp(-Emat/58613.08508)+926.81763*exp(-Emat/1.23352E9),
TlasE=820.78533+0.00519*Emat,
poptE=0.11254+2.42726E-6*Emat,
doptE=0.21347+4.60403E-6*Emat,
zoptE= 1.369*exp(-Emat/6482.26468)+1.4682*exp(-Emat/151498.33339),
foptE=-0.44854+6.39196E-6*Emat+2.44832E-11*Emat ² -2.55871E-16*Emat ³ +4.98571E-22*Emat ⁴ ,
Ktechopt=VlasE/(poptE*doptE*WlasE),
RadZo=Rasigsumo,Radopt=Ktechopt.*Rasigsumo,

Třetím krokem je kontrolní výpočet distribuce drsností teoretických T a měřených M .

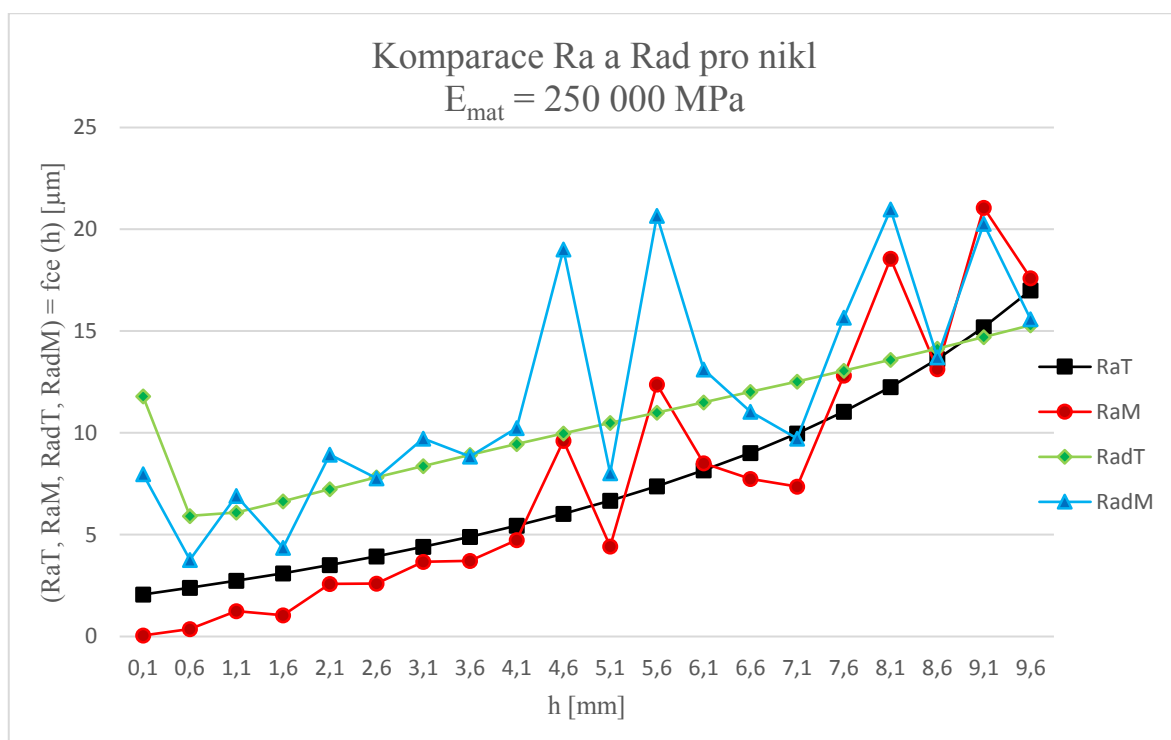
Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti povrchu na analyzovaných materiálech jsou uvedeny grafickou formou na obr.6.19 až obr.6.24. Tabulková (číselná) forma je uvedena v přílohách. Technologické parametry pro vybrané materiály jsou v tab.6.14.

tab.6.14 Technologické parametry pro vybrané materiály

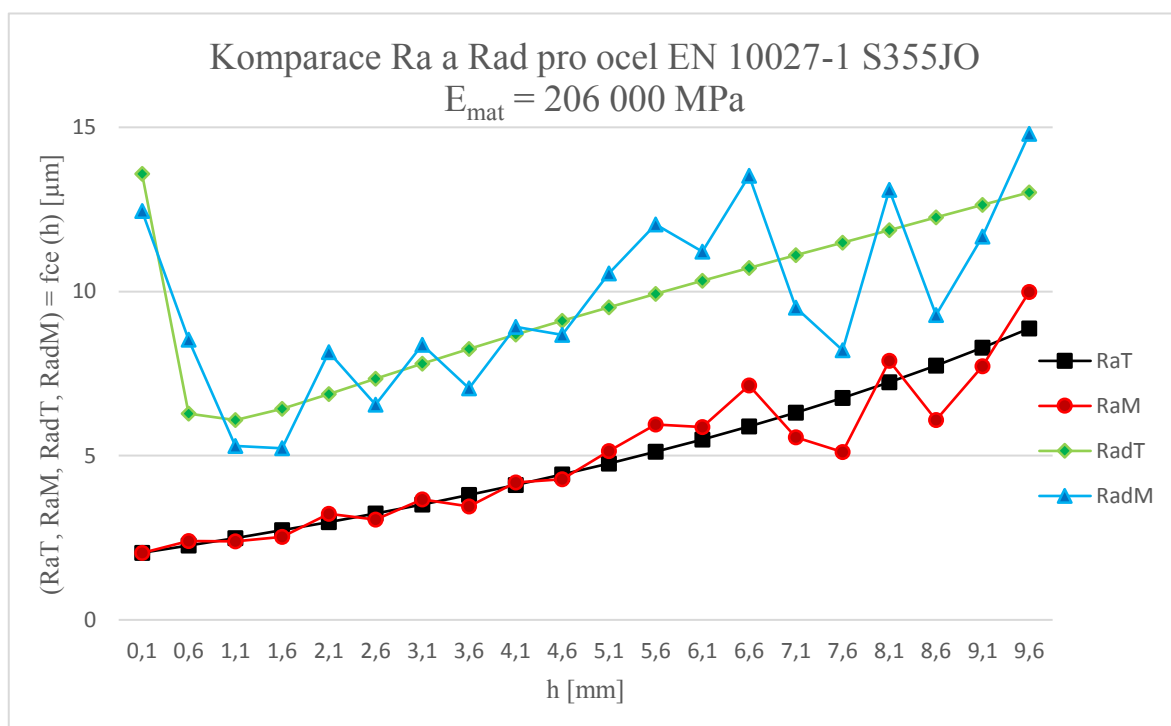
Materiál	S235JRH (ČSN 11375)	NIKL	EN 10027-1 S355JO	AISI 304 (ČSN 17240)	TITAN	MĚD
E_{mat} [MPa]	195000	250000	206000	167000	130000	100000
K_{cutL} [μm]	26,3	16	23,56	35,86	59,17	100
h_0 [mm]	8,38	4,32	6,37	9,69	15,99	27,03
T_{melt} [$^{\circ}\text{C}$]	1832,8	2613,94	2225,86	1881,88	1555,54	1290,94
W_{lasT} [W]	2726,4	3350	2850	2410	1990	1650
v_{lasT} [mm/min]	2313,4	2173,5	2274,11	2454,21	2780,35	3245,99
T_{lasT} [$^{\circ}\text{C}$]	1832,8	2119,09	1890,59	1688,05	1495,9	1340,11
p_{lasT} [bar]	0,59	0,72	0,61	0,52	0,43	0,36
d_{lasT} [mm]	1,11	1,36	1,16	0,98	0,81	0,67
z_{opt} [mm]	0,4	0,32	0,4	0,49	0,6	0,72
f_{opt} [mm]	0,55	0,71	0,52	0,38	0,27	0,17
$K_{techopt}$ [-]	1,3	0,85	1,44	2,56	5,14	10,5
Ra_{d0} [μm]	8,4	7,4	8,15	9,05	10,26	11,7
σ_{rad0} [MPa]	441,6	500	453,87	408,66	360,56	316,23
γ_0 [N/m]	2150,63	2805,45	2355,61	1956,89	1578,62	1271,92
h_{Xtp} [mm]	5,3	4,1	2,7	6,6	15,9	23



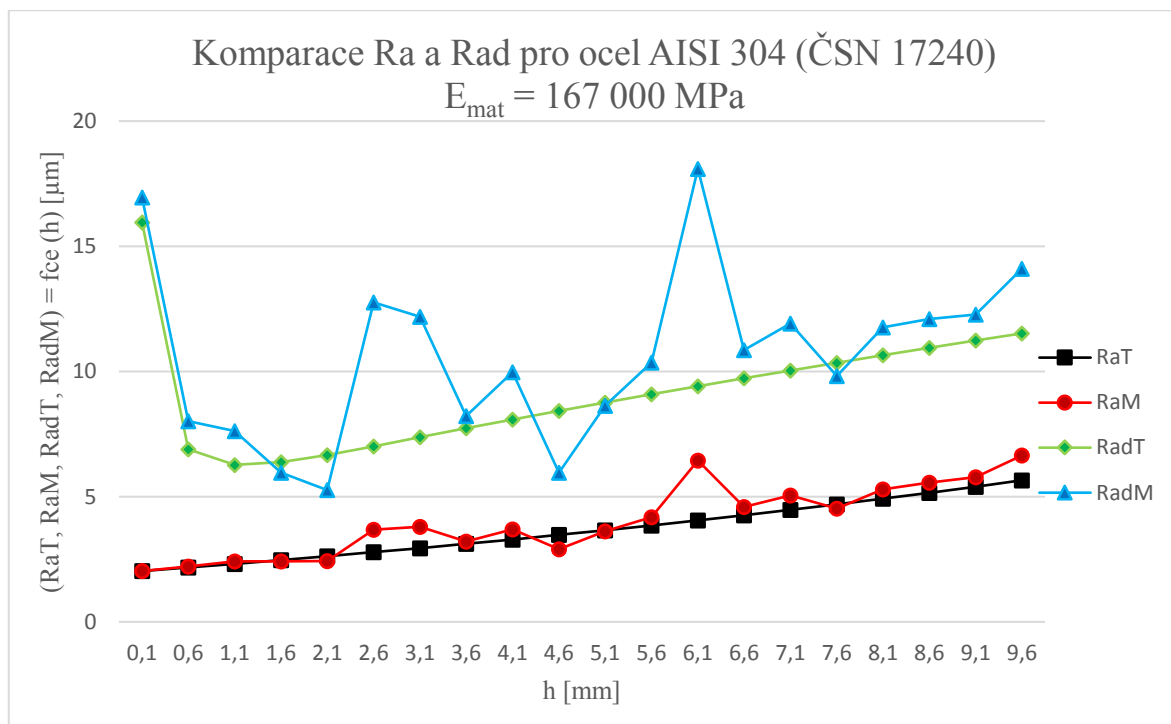
obr.6.19 Komparace teoretických a naměřených hodnot drsností pro ocel S235JRH



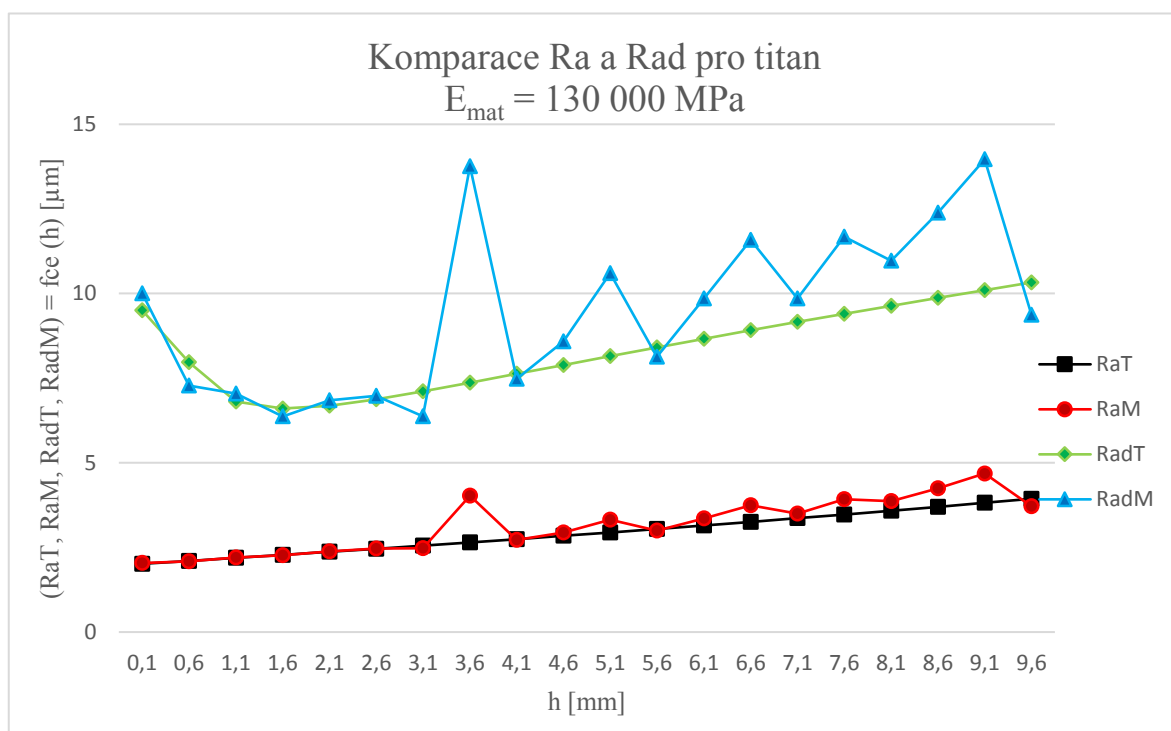
obr.6.20 Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti pro nikl



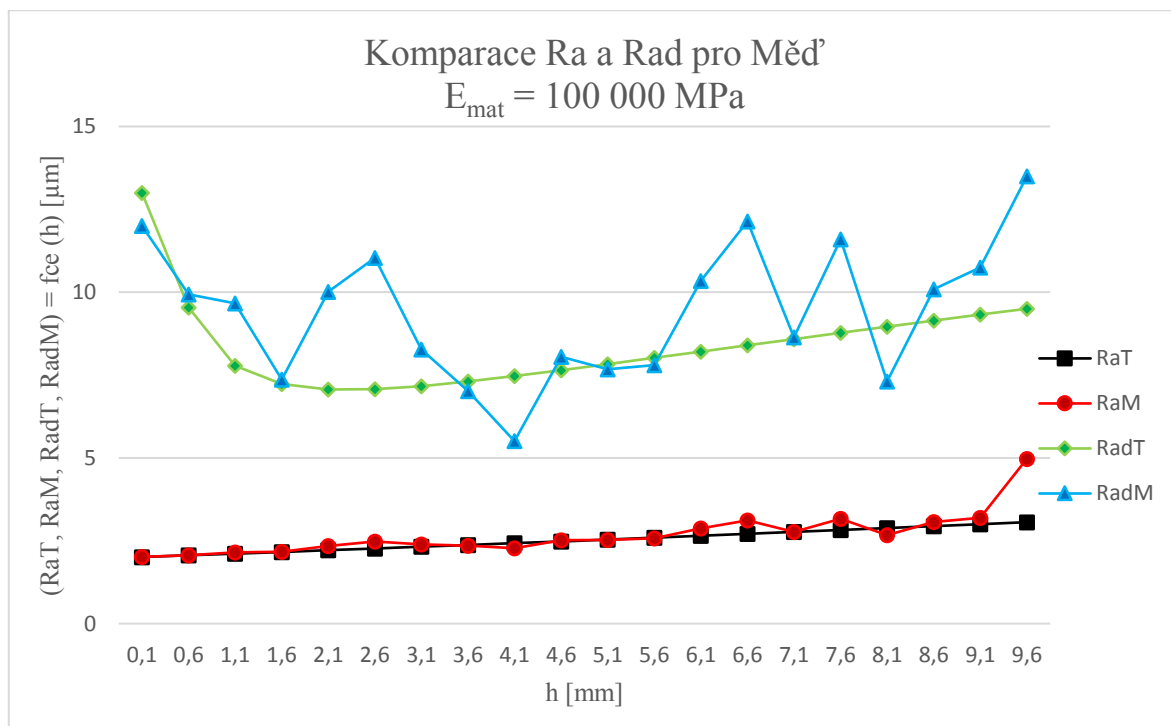
obr.6.21 Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti pro ocel S355JO



obr.6.22 Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti pro ocel AISI304

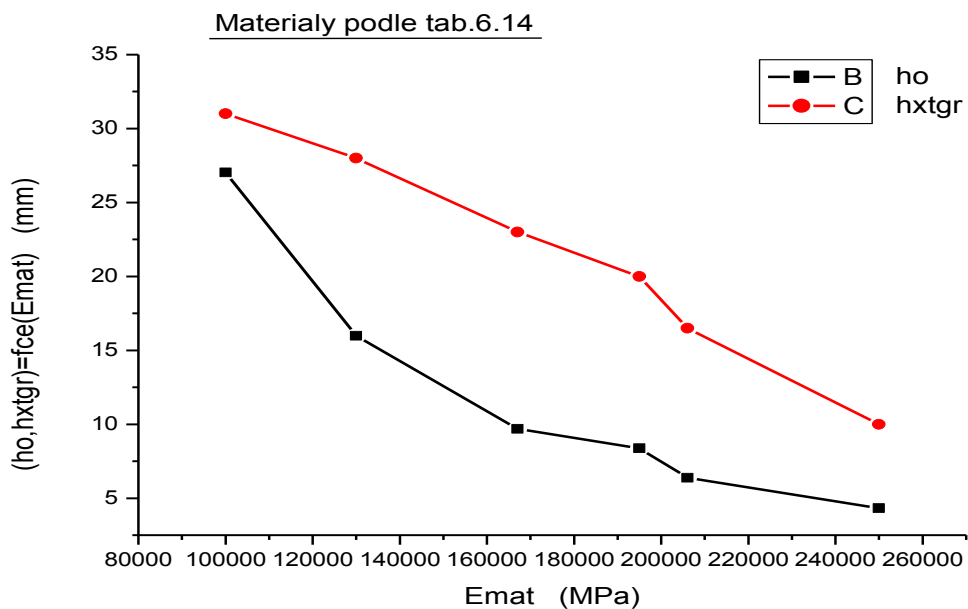


obr.6.23 Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti pro titan



obr.6.24 Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti pro měď

Graf na obr.6.25 ilustruje vztah mezi průběhy parametrů h_o a $h_{xt}(gr)$ podle E_{mat} jednotlivých vybraných materiálů dle tab.6.14.



obr.6.25 Závislost parametrů $(h_o, h_{xt}(gr)) = fce(E_{mat})$ pro vybrané materiály

Podle prezentovaných grafů a také z grafu na obr.6.25 plyne jednoznačný závěr, že hloubka objemového tavení h_{xt} významně klesá s rostoucí hodnotou E_{mat} materiálu. Odvození vztahu pro výpočet limitní hloubky h_0 je vyjádřeno vztahem (6.17)

$$h_0 = h_j \cdot \frac{K_{plmat}}{Ra_o}, [mm] \quad (6.17)$$

Kde h_j je jednotková hloubka řezu, $h_j = 1 \text{ mm}$ a $h_{lim} = K_{plmat} [mm]$

6.7 Hodnocení dosažených výsledků

V diplomové práci je v komplexním pojetí provedeno, na základě shrnutí současného stavu poznání o aktuálních požadavcích praxe i výzkumu, teoretické zpracování a základní projekt provozní aplikace nového způsobu navrhování a řízení technologie dělení materiálu laserem. Především však na základě nových poznatků podle oponovaných, publikovaných a patentovaných prací Institutu fyziky HGF VŠB-TUO, např. [9], [10], [11], [34]. Tohoto cíle bylo dosaženo především systemizovaným odvozováním a definováním vzájemných funkčně determinovaných vztahů mezi parametry procesu dělení, který považujeme za fyzikálně – mechanicky integrovaný celek. Řešení zpracované v projektu přináší:

Teoretický přínos:

- odvození vztahů pro výpočet limitní hloubky,
- odvození způsobu identifikace kritického teplotního termodynamického bodu v řezu X_{tp} ,
- odvození vztahů pro teoretickou predikci finálních drsností dělených povrchů,
- odvození způsobu výpočtu distribuce hlavních termodynamických funkcí procesu .

Parciální výsledky práce byly konzultované, částečně ověřené a připravuje se celkové ověření přímo v provozu na pracovišti Metakov s.r.o Spišská Nová Ves a publikované na různých úrovních s kladnou odezvou (na základě kterých byla navázána spolupráce s různými pracovišti např. ÚGN AV ČR, v. v. i., TU Nitra, ČZU Praha, Univerzity of Osijek v Chorvatsku, TU Koszalin, *ArcelorMittal Frýdek-Místek a.s.*, SIEMENS VAI -Linz-Rakousko).

Využití teoretického přínosu práce:

- pro další technologie dělení materiálů s flexibilním dezintegračním nástrojem: vodní proud, plazma, kyslík, ultrazvuk,
- ve všech provozovnách a laboratořích využívajících technologii laserového řezání,
- ve všech provozovnách a laboratořích využívajících k obrábění nástroje flexibilního typu,
- komplexní a optimalizované naprojektování nejdůležitějších provozních parametrů pro řezání technických materiálů technologií laserového paprsku, a to na základě exaktního přístupu, který dosud nebyl nikde, u nás ani ve světě, komplexně rozpracovaný,
- v rámci spolupráce s firmou Metakov s.r.o, Spišská Nová Ves byl vypracovaný projekt pro aplikaci dosud získaných výsledků,
- možnost využití nových postupů a poznatků v aplikačním i v základním výzkumu.

V praxi:

- navrhované řešení umožňuje komplexní a optimalizované naprojektování nejdůležitějších provozních parametrů pro řezání technických materiálů technologií laserového paprsku, a to na základě exaktního přístupu, který dosud nebyl nikde rozpracovaný. V provozu není k dispozici a navržení těchto důležitých parametrů je proto dosud nutné realizovat pouze na základě subjektivního rozhodování. Tento nedostatek se potom často odráží v nedostatečné kvalitě, nízké produktivitě práce, v celkové ekonomice a v nižší konkurenceschopnosti technologie.
- nový způsob řešení obohacuje a zvyšuje teoretickou i aplikační úroveň současného stavu v technologii
- může být ihned využito v podnicích, provozovnách a ve výzkumu.
- v rámci spolupráce s firmou Metakov, s.r.o a Ústavem Geoniky AV ČR je dohodnuto patentování nových poznatků.
-

Ve vědě a výzkumu:

Inovativní a zcela původní cestou na základě studia generovaných povrchů v obráběcích technologiích jsou dosahované výsledky a poznatky, které se bezprostředně dotýkají současného stavu poznání a aktuálních požadavků v aplikovaném i základním výzkumu. Novou cestou získávané poznatky mohou bezprostředně doplnit současnou teoretickou bázi v oborech mechaniky procesů, defektoskopie, materiálového inženýrství a pružnosti-pevnosti.

V pedagogické rovině:

Kromě uvedených praktických přínosů je možné výstupy práce využít také v pedagogické praxi pro doplnění výuky v dotčených technických předmětech.

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést dostatečně podrobné zhodnocení současného stavu technologie dělení technických materiálů laserem. Vytypovat řadu stávajících nedořešených problémů zejména v oblasti projektové přípravy a dimenzování technologických režimů. Tak, aby správnou volbou technologie byly respektovány požadavky související s mechanickými i termodynamickými vlastnostmi flexibilního dělicího nástroje a vlastnostmi děleného materiálu a současně naplněny požadavky na výkon, kvalitu a ekonomiku provozu. Byl provedený rozbor problému, ověření koncepce řešení, výběr experimentálních postupů a volba experimentálních metod, vlastní měření, analýza a interpretace výsledků. Za účelem dosažení uvedeného cíle byl zvolen nový rozvíjený postup řešení problematiky. Jde o řešení komplexu technologických úloh na základě výzkumu geometrických parametrů topografie nově vytvářených povrchů různými technologiemi. To se týká také povrchů řezných stěn vytvořených laserovým řezáním a dělením. V rámci interpretace naměřených hodnot jsou v diplomové práci systematicky analyzované vztahy mezi topografickými a technologickými parametry a formulované fyzikálně – mechanické a distribuční principy, kterými se řídí. Byly nalezeny vztahy k probíhajícím termodynamickým procesům. Identifikován a nadefinován kritický termodynamický teplotní bod. Dosažené výsledky dávají předpoklad výhodného využití v praxi i v dalším výzkumu a vývoji technologie. Základní tvary nově odvozených rovnic včetně tvarů modifikovaných umožňují interaktivní a hlavně operativní matematické modelování stavu řezu až do limitních hloubek a umožňují exaktní optimalizaci parametrů řezání materiálů. Komplexní pojetí řešení a dosažené výsledky splňují teoretické předpoklady a požadavky současné technologické praxe i výzkumu. Řešení může být ihned využito v podnicích, provozovnách a na výzkumných pracovištích. Koncepčně novou cestou výzkumu, která zcela původním způsobem využívá především informace z topografie obrobených povrchů, jsou získávané nové výsledky a poznatky. Ty se bezprostředně dotýkají a mohou i přispět k aktuálnímu stavu teoretické báze v současném aplikovaném i základním výzkumu a také ve výuce dotčených technických předmětů.

Seznam použité literatury

- [1] AMELINCKX, Severin. *Electron microscopy: principles and fundamentals: principles and fundamentals*. Weinheim: VCH, 1997. ISBN 35-272-9479-1.
- [2] BUMBÁLEK, Bohumil a Vladimír ODVODY. *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL, 1989.
- [3] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) : Struktura povrchu: Profilová metoda. Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha, 1998. 22 s.
- [4] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) : Struktura povrchu: Profilová metoda. Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha, 1997. 15 s.
- [5] DADO, Milan. *Kapitoly z optiky: pre technikov*. Žilina: EDIS, 1998. ISBN 80-7100-390-5.
- [6] ENGST, Pavel a Milan HORÁK. *Aplikace laserů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Populární přednášky o fyzice.
- [7] GOEKE, A., EMMELMANN, C. (2010). *Influence of Laser Cutting Parameters on CFRP Part Quality*. Physics Procedia 5 : 253–258.
- [8] HARNIČÁROVÁ, Marta, Jan VALÍČEK, Andreas ÖCHSNER, Radovan GRZNÁRIK, Milena KUŠNEROVÁ, Josef NEUGEBAUER a Dražan KOZAK. *Predicting residual and flow stresses from surface topography created by laser cutting technology*. Optics & Laser Technology [online]. 2013, 52, 21-29 [cit. 2017-05-09]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2013.03.024. ISSN 00303992.
- [9] HARNIČÁROVÁ, Marta, Jan VALÍČEK, Milena KUŠNEROVÁ a Radovan GRZNÁRIK. (2015). *Control of laser cutting by process timing*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 46(4-5), 394-400.
- [10] HARNIČÁROVÁ, Marta, Jan, VALÍČEK, Milena KUŠNEROVÁ, Radovan GRZNÁRIK, Jana PETRŮ a Lenka ČEPOVÁ. (2012). *A new method for the prediction of laser cut surface topography*. Measurement Science Review, 12(5), 195-204.
- [11] HARNIČÁROVÁ, Marta, Jan VALÍČEK, Milena KUŠNEROVÁ, Zuzana HUTYROVÁ, Anton PANDA a T. TEMUČIN. (2016). *Method of determination of enthalpy and entropy for the technology of laser cutting*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 47(5-6), 452-461.
- [12] HARNIČÁROVÁ, Marta. *Štúdium vlastností materiálov pri rezaní laserovým lúčom*. Prešov, 2011. Dizertačn. Technická univerzita v Košicih.

- [13] LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 3., dopl. vyd., dot. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-164-6.
- [14] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [15] MIČIETOVÁ, Anna. *Nekonvenčné metódy obrábania*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2001. ISBN 80-7100-853-2.
- [16] MLČOCH, Lubomír a Ivan SLIMÁK. *Řízení kvality a strojírenská metrologie*. Praha: SNTL, 1987.
- [17] MRŇA, Libor. *Dělení materiálů laserem* [online]. In: . Strojárstvo/strojírenství, 2017 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/1308-dleni-material-laserem>
- [18] OHLÍDAL, M a K PÁLENÍKOVÁ. *Možnosti optického profilometru MicroProf FRT při 3D hodnocení kvality povrchu*. Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, Jemná mechanika a optika 49, (9): 251-259.
- [19] PETERKA, Pavel. *Vláknové lasery*. Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR, 2014.
- [20] POLÁK, Rudolf a Rudolf ZAHRAVNÍK. *Obecná chemie: stručný úvod*. Praha: Academia, 2000. ISBN 8020007946.
- [21] RUTHERFORD, Ernest. *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom* [online]. , 24 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://mrmackenzie.co.uk/wp-content/uploads/2011/05/Rutherford-paper.pdf>
- [22] SALMINEN, A., KUJANP, V., XIAO, Z. *Laser Cutting of Structural Steel with High Beam Quality*, 27th International Congress on Laser & Electro-Optics, (ICALEO2008), Oct. 20-23, 2008, Temecula, CA, U.S.A.
- [23] SHEBZUKHOVA, M. A., SHEBZUKHOV, Z. A., SHEBZUKHOV, A. A. (2010). *The Tolman Parameter, Self-Absorption, and Surface Tension on Flat and Curved Surfaces of Liquid Metals*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics 74 (5):697 – 704.
- [24] SILFVAST, William Thomas. *Laser fundamentals*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2004. ISBN 0-521-83345-0.
- [25] SOCHOR, Václav. *Lasery a koherentní svazky*. Praha: Academia, 1990. Cesta k vědění (Academia), sv. 43. ISBN 80-200-0354-1.
- [26] STEEN, William. *Laser material processing*. 3rd ed. New York: Springer, c2003. ISBN 1-85233-698-6.

- [27] *Surfrest SJ-400* [online]. © 2011 Mitutoyo America Corporation, Aurora IL [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: http://www.mitutoyo.com/Images/003/308/2013_SJ-400.pdf
- [28] ŠMÍD, Jiří. *Laser Microjet LCS 50*. MM Průmyslové Spektrum [online]. 2015 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/novinka/laser-microjet-lcs-50.html>
- [29] ŠMÍD, Jiří. *Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2007 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser.html>
- [30] ŠULC, Jan. 2002. *Lasery a jejich aplikace* [online]. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
- [31] *The Race to Build a Laser* [online]. © 2017 American Institute of Physics [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://history.aip.org/history/exhibits/laser/sections/therace.html>
- [32] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0672-x.
- [33] TRUMPF. *TruLaser 3030 Lean Edition* [online]. 2017 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/2d-laserove-rezaci-stroje/trulaser-3030-lean-edition/
- [34] VALÍČEK, Jan, A. BOROVIČKA, S. HLOCH a P. HLAVÁČEK, *Způsob stanovení konstanty hydroabrazivní dělitelnosti materiálu Kawj*. Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Ostrava. Patentový spis CZ 305547 B6. 21.10.2015
- [35] VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01108-9.
- [36] WAHAB, Hud, Jürgen GRÖNINGER, Klaus DICKMANN, P. BRUNS, M. VOß, I. KARDOSH, J. MEINSCHIEN a L. ASCHKE. *Optimization of Laser Cutting Quality with Design of Experiments*. Laser Technik Journal [online]. 2014, 11(5), 27-31 [cit. 2017-05-01]. DOI: 10.1002/latj.201400046. ISSN 16137728. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/latj.201400046>
- [37] Webová stránka: <http://www.metakov.eu/>

Přílohy

Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti povrchu pro ocel S235JRH
(ČSN 11375)

Ocel S235JRH (ČSN 11375), $E_{mat} = 195\,000$ MPa				
h	RaT	RaM	$RadT$	$RadM$
0,1	0,5382	0,0385	13,445	11,5186
0,6	0,7335	0,2314	6,3983	4,355
1,1	0,9365	0,876	6,114	8,2483
1,6	1,1478	0,6712	6,4026	4,5618
2,1	1,3678	1,0366	6,8125	5,7482
2,6	1,5971	1,1472	7,2471	5,4869
3,1	1,8363	1,2465	7,6798	5,299
3,6	2,086	3,0797	8,103	11,8485
4,1	2,347	2,3288	8,5148	8,2153
4,6	2,62	2,8908	8,9156	9,4286
5,1	2,9058	3,5765	9,3065	10,8604
5,6	3,2055	2,0524	9,6887	5,832
6,1	3,52	4,4447	10,0635	11,8659
6,6	3,8505	3,88	10,4322	9,7646
7,1	4,1982	3,4215	10,7957	8,1368
7,6	4,5645	4,1971	11,1552	9,4529
8,1	4,9509	6,6371	11,5116	14,1819
8,6	5,3592	7,8982	11,8656	16,0342
9,1	5,7912	6,8907	12,2183	13,3074
9,6	6,249	10,801	12,5703	19,8603

Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti povrchu pro Nikl

Nikl, $E_{mat} = 250\,000\text{ MPa}$				
<i>h</i>	<i>RaT</i>	<i>RaM</i>	<i>RadM</i>	<i>RadT</i>
0,1	2,0629	0,051	7,971	11,8055
0,6	2,3896	0,375	3,7709	5,9256
1,1	2,7383	1,245	6,9052	6,0975
1,6	3,1111	1,045	4,3646	6,6429
2,1	3,5108	2,5801	8,9337	7,2328
2,6	3,9403	2,5951	7,7752	7,8139
3,1	4,4031	3,6676	9,7304	8,377
3,6	4,9032	3,7103	8,8452	8,9226
4,1	5,4454	4,7342	10,2432	9,4538
4,6	6,0351	9,6206	19,0092	9,9743
5,1	6,6789	4,4235	8,0242	10,4875
5,6	7,3846	12,3729	20,6694	10,9966
6,1	8,1616	8,5077	13,1238	11,5048
6,6	9,0213	7,7429	11,0442	12,0148
7,1	9,9775	7,3654	9,7217	12,5296
7,6	11,0476	12,8261	15,668	13,0522
8,1	12,2532	18,5662	20,9759	13,5857
8,6	13,6216	13,1358	13,7153	14,1338
9,1	15,1884	21,0627	20,2802	14,7005
9,6	17	17,5973	15,5909	15,2906

Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti povrchu pro ocel EN 10027-1
S355JO

Ocel EN 10027-1 S355JO, $E_{\text{mat}} = 206\,000\text{MPa}$				
<i>h</i>	<i>RaT</i>	<i>RaM</i>	<i>RadM</i>	<i>RadT</i>
0,1	2,0426	2,0384	12,4476	13,5876
0,6	2,2613	2,3993	8,5292	6,2812
1,1	2,4897	2,3954	5,2948	6,0838
1,6	2,7284	2,5308	5,2254	6,4284
2,1	2,9783	3,2334	8,1493	6,8777
2,6	3,2402	3,057	6,5547	7,3436
3,1	3,5148	3,665	8,3777	7,8033
3,6	3,8032	3,4564	7,0494	8,251
4,1	4,1064	4,1824	8,9273	8,686
4,6	4,4255	4,2784	8,6771	9,1092
5,1	4,762	5,1405	10,5531	9,5223
5,6	5,1172	5,9473	12,0381	9,9268
6,1	5,4927	5,8674	11,2174	10,3243
6,6	5,8904	7,1427	13,5229	10,7163
7,1	6,3122	5,5573	9,5092	11,1039
7,6	6,7604	5,1159	8,2099	11,4885
8,1	7,2377	7,8878	13,0963	11,871
8,6	7,7468	6,0817	9,2822	12,2527
9,1	8,2911	7,7215	11,6718	12,6345
9,6	8,8744	9,9905	14,8063	13,0175

Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti povrchu pro ocel AISI 304
(ČSN 17240)

Ocel AISI 304 (ČSN 17240), $E_{\text{mat}} = 167\,000\text{ MPa}$				
h	RaT	RaM	$RadM$	$RadT$
0,1	2,028	2,03	16,9548	15,9533
0,6	2,1702	2,2098	8,0231	6,8949
1,1	2,3165	2,4173	7,6269	6,2715
1,6	2,4671	2,4229	5,9616	6,3775
2,1	2,6221	2,4351	5,2635	6,6676
2,6	2,7818	3,6781	12,7562	7,0125
3,1	2,9464	3,7934	12,1794	7,3715
3,6	3,1161	3,2113	8,2191	7,7299
4,1	3,2911	3,6922	9,9724	8,0825
4,6	3,4717	2,9065	5,9584	8,4273
5,1	3,6582	3,6248	8,6282	8,7642
5,6	3,8508	4,1819	10,3624	9,0933
6,1	4,05	6,45	18,0952	9,4153
6,6	4,2559	4,5846	10,8572	9,7309
7,1	4,469	5,0454	11,9178	10,0407
7,6	4,6897	4,5221	9,8247	10,3453
8,1	4,9182	5,2947	11,7606	10,6454
8,6	5,1552	5,564	12,1002	10,9416
9,1	5,4011	5,783	12,2714	11,2343
9,6	5,6562	6,6452	14,1009	11,524

Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti povrchu pro titan

Titan, $E_{\text{mat}} = 130\,000\text{ MPa}$				
h	RaT	RaM	$RadM$	$RadT$
0,1	2,0169	2,0382	10	9,501
0,6	2,1024	2,0909	7,2827	7,9679
1,1	2,1894	2,1988	7,0458	6,8091
1,6	2,2779	2,2639	6,3688	6,6035
2,1	2,368	2,3806	6,844	6,6834
2,6	2,4596	2,4692	6,9746	6,873
3,1	2,5529	2,4727	6,3689	7,1088
3,6	2,6478	4,0246	13,7616	7,3641
4,1	2,7445	2,7254	7,4827	7,6266
4,6	2,8429	2,9429	8,589	7,8901
5,1	2,9432	3,3188	10,6013	8,1517
5,6	3,0453	3,0007	8,136	8,41
6,1	3,1494	3,3544	9,8529	8,6641
6,6	3,2554	3,7405	11,5854	8,9139
7,1	3,3635	3,4959	9,8549	9,1594
7,6	3,4737	3,9274	11,6799	9,4007
8,1	3,586	3,8621	10,9679	9,638
8,6	3,7006	4,2439	12,3858	9,8715
9,1	3,8174	4,684	13,9636	10,1014
9,6	3,9366	3,7142	9,371	10,3279

Komparace teoretických a naměřených hodnot drsnosti povrchu pro měď

Měď, $E_{\text{mat}} = 100\,000\text{ MPa}$				
<i>h</i>	<i>RaT</i>	<i>RaM</i>	<i>RadM</i>	<i>RadT</i>
0,1	2,01	2,015	12	13
0,6	2,0604	2,0636	9,938	9,5434
1,1	2,1112	2,1476	9,6658	7,7807
1,6	2,1626	2,1669	7,3678	7,2273
2,1	2,2145	2,3396	10,0144	7,0651
2,6	2,2669	2,4758	11,0387	7,0733
3,1	2,3199	2,3884	8,273	7,1662
3,6	2,3734	2,3533	7,0179	7,3044
4,1	2,4275	2,2743	5,5071	7,4677
4,6	2,4822	2,5168	8,0503	7,6449
5,1	2,5374	2,5233	7,6773	7,8297
5,6	2,5932	2,572	7,8021	8,0183
6,1	2,6496	2,8725	10,3369	8,2082
6,6	2,7066	3,1198	12,1383	8,3981
7,1	2,7643	2,7703	8,6384	8,587
7,6	2,8225	3,1658	11,6009	8,7745
8,1	2,8814	2,672	7,3063	8,96
8,6	2,9409	3,0656	10,0902	9,1435
9,1	3,0011	3,1953	10,7457	9,3248
9,6	3,0619	4,9734	13,5	9,504